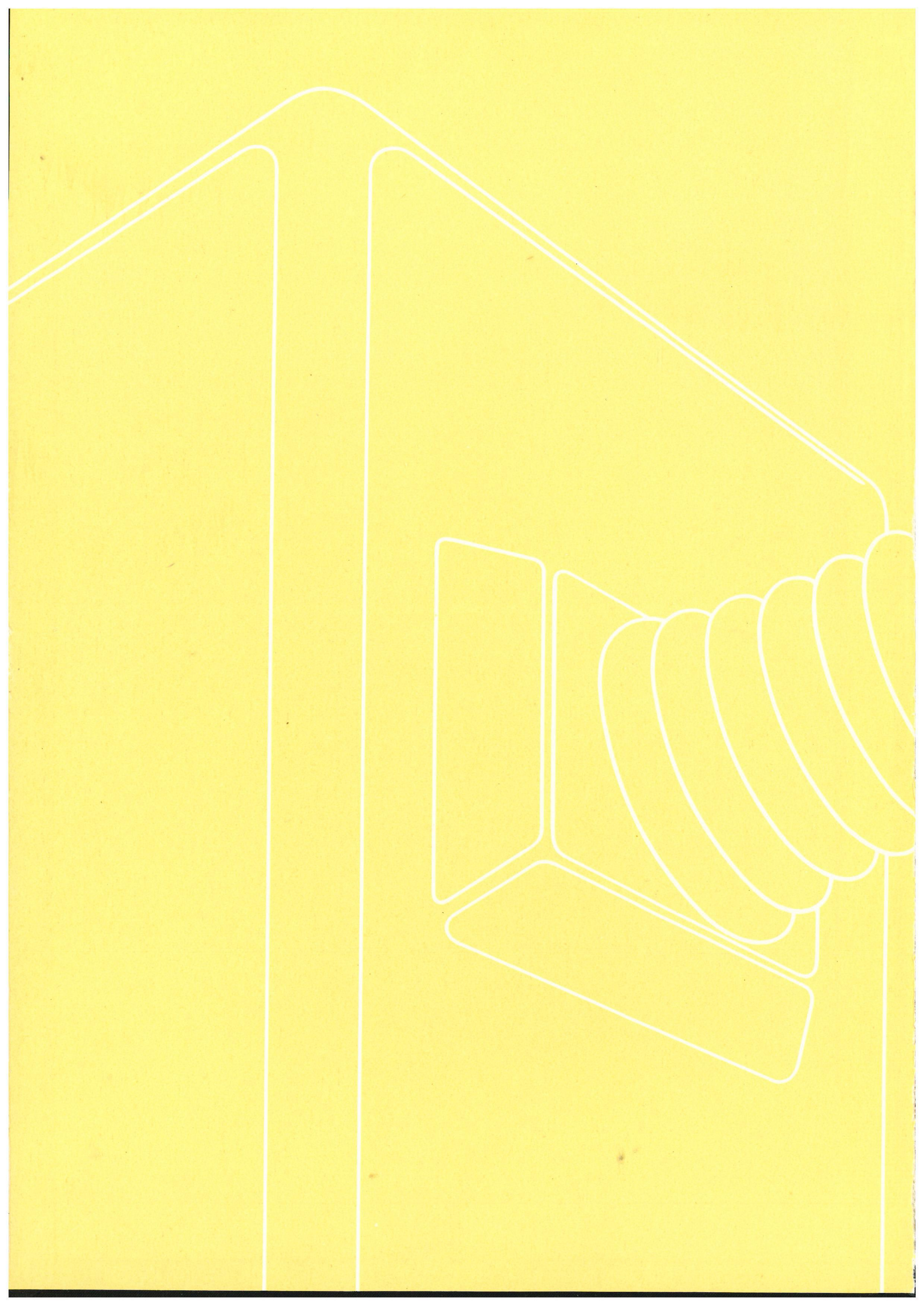


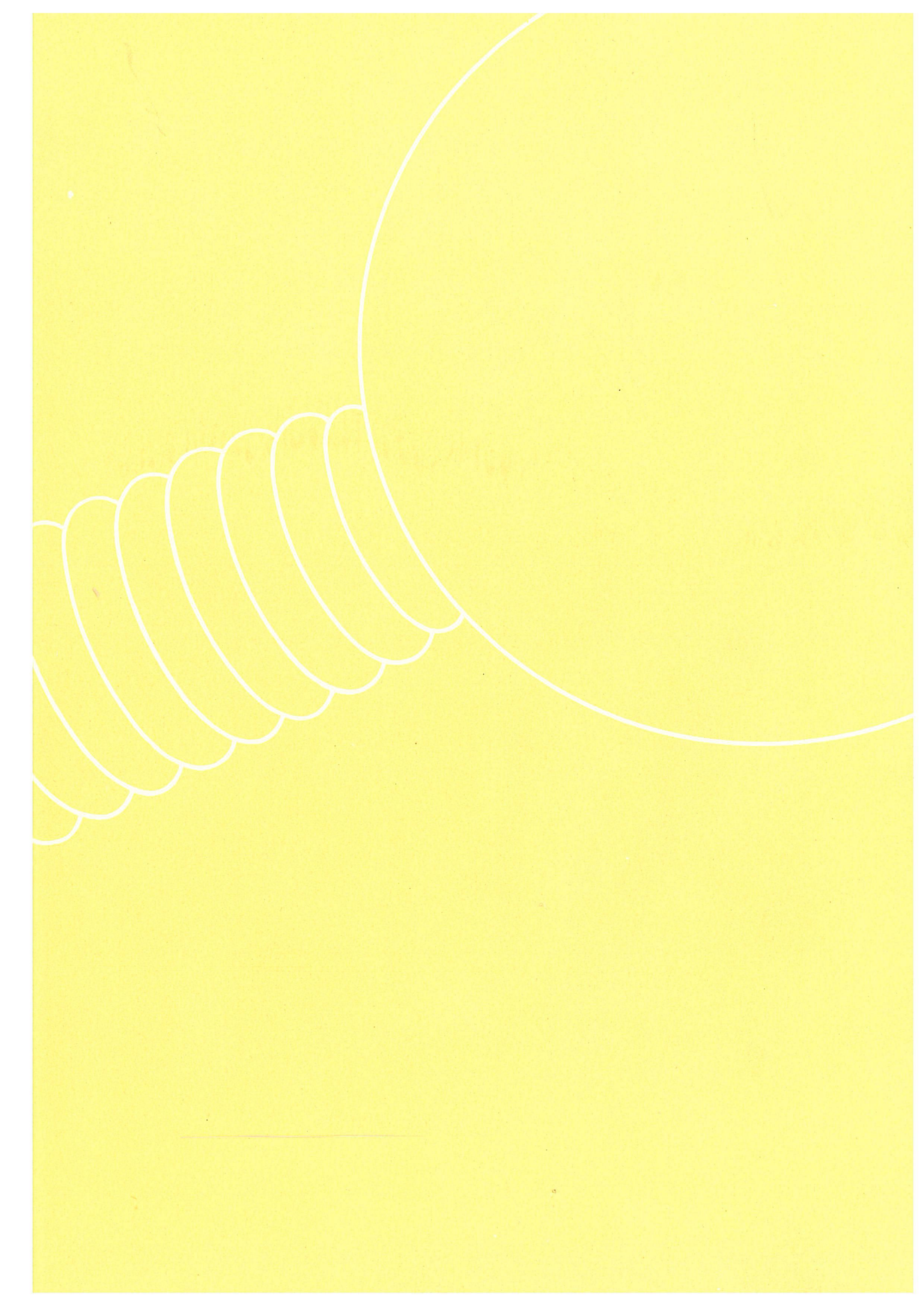
DAS HOCHSPANNUNGS-INSTITUT DER AEG

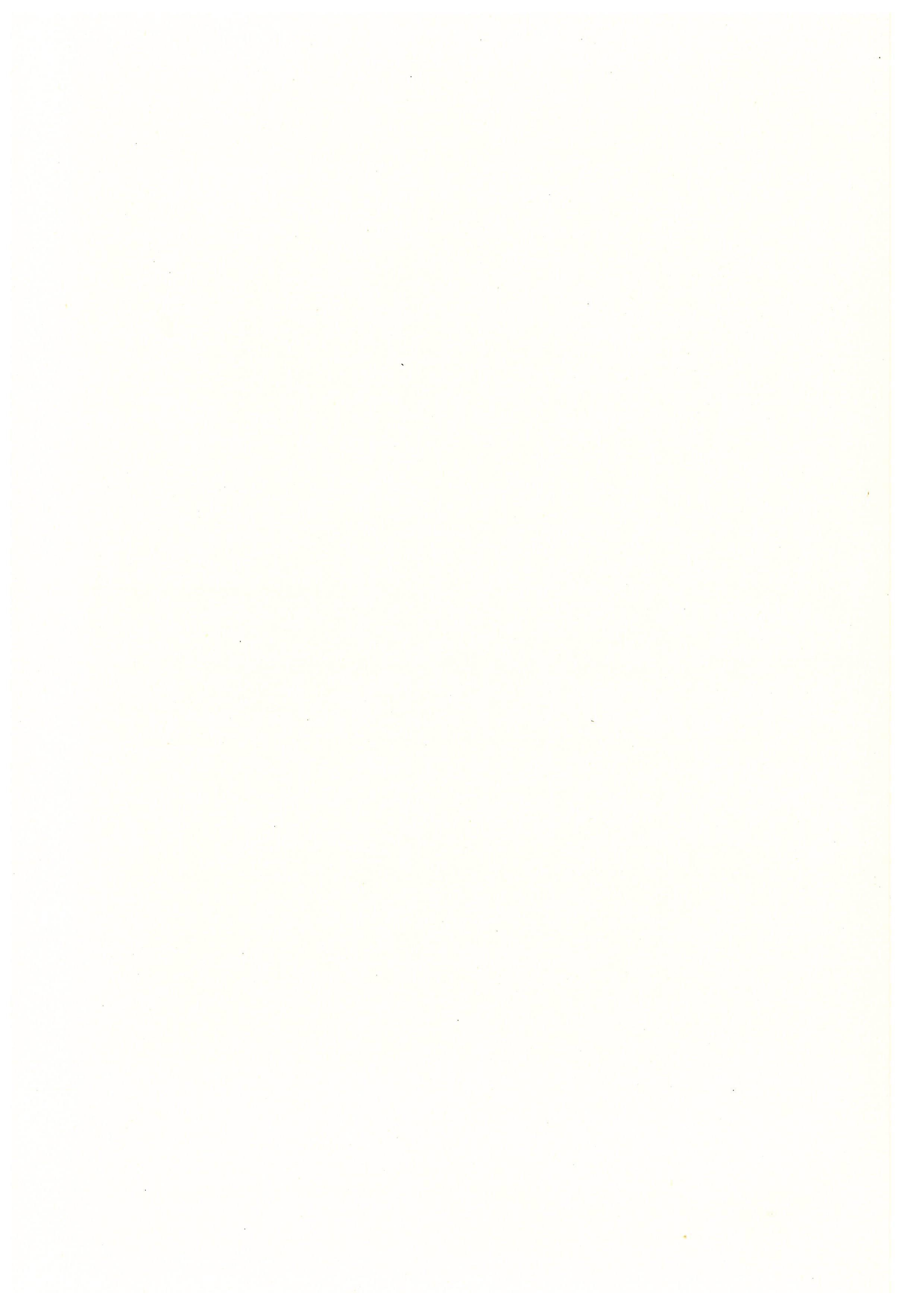


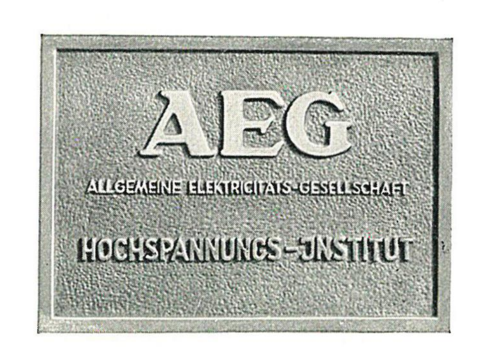


Festschrift
zur Eröffnung des Instituts in Kassel

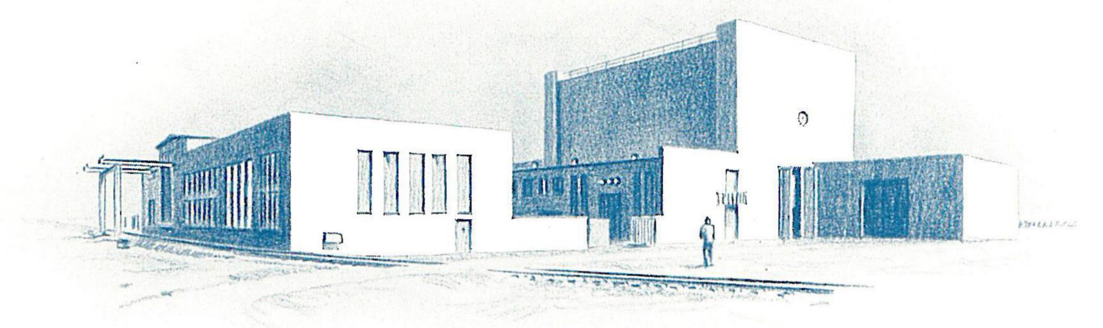







AEG
ALLGEMEINE ELEKTRICITÄTS-GESELLSCHAFT
HOCHSPANNUNGS-INSTITUT

Das Hochspannungs-Institut der AEG



Festschrift zur Eröffnung des Instituts in Kassel

HERAUSGEBER: ALLGEMEINE ELEKTRICITÄTS-GESELLSCHAFT · BERLIN 1953

An dieser Schrift haben mitgearbeitet:

J. Biermanns, A. Hochrainer, O. Mayr, F. Petermichl, G. Bohn, G. Nimsch, A. Dobbertin, E. Slamecka, F. Opitz, R. Crämer, R. Küchler, H. Papen, W. Herbst, R. Gärtner.

Herausgeber: Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft. Schriftleitung: K. Johannsen, Berlin-Grunewald.

ZUM GELEIT

Beim Wiederaufbau nach dem Kriege verfuhr die AEG nach dem Grundsatz, nicht nur die verbliebenen Fabriken wieder instandzusetzen und als Ersatz für die verlorengegangenen neue Fertigungsstätten zu errichten, sondern auch jene Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten wieder zu schaffen, deren Ergebnisse nicht zuletzt das Ansehen der Firma im In- und Ausland begründet haben.

Mehr noch als auf anderen Gebieten erwiesen sich die Erfahrungen unserer Mitarbeiter als kostbarstes Gut, als wir die Entwicklungs- und Forschungstätigkeit nach den Kriegsverlusten wieder aufnahmen. In Berlin und an verschiedenen Orten des Bundesgebietes wurde in unseren neuerstandenen Laboratorien die Tradition der AEG-Forschung fortgesetzt.

Wir berichten in dieser Schrift über das neue AEG-Hochspannungs-Institut in Kassel. Seine Einrichtungen, darunter die neuzeitliche Versuchsanlage für große Kurzschlußleistungen, und seine Arbeit dienen der Hochspannungs- und Schaltertechnik, zu deren Grundlagen und Fortschritten die AEG entscheidende Beiträge geleistet hat.

Koehn

Dr.-Ing. E.h. Otto Koehn,
Vorstandsmitglied der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft

AUS DER GESCHICHTE DER HOCHSPANNUNGSTECHNIK

Josef Biermanns

DK 621.3.027.3/.8 (091)

Die Geschichte der Hochspannungstechnik setzt mit der Jahrhundertwende ein. Ihre große Entwicklung begann um das Jahr 1910, als die Starkstromtechnik ihren Kinderschuhen entwachsen war und sich anschickte, zum unentbehrlichen Helfer des Menschen zu werden. Damals entstanden die ersten, größere Bezirke überspannenden elektrischen Verteilungsnetze, und mit dem steigenden Bedarf an elektrischer Energie und der zunehmenden Ausdehnung der Netze wuchs deren Betriebsspannung. Wir können seit 1900 ein sich bis heute fortsetzendes, stetiges Anwachsen des Verbrauches elektrischer Energie beobachten, dem ein ebenso stetiges Anwachsen der benutzten Übertragungsspannungen entspricht. Diese wuchsen linear mit der verflossenen Zeit, während sich eine quadratische Zunahme der verbrauchten elektrischen Energie mit der Zeit feststellen läßt. Die auftretenden Kurzschlußleistungen erhöhten sich sogar wegen der zunehmenden Vermaschung der Netze und deren gegenseitiger Verkupplung und wuchsen bisher mit der vierten Potenz der fortschreitenden Zeit. Mit diesen Feststellungen sind die Aufgaben umrissen, vor die sich die Hochspannungstechnik von Anfang an gestellt sah.

Wir haben in der Hochspannungstechnik eine junge Technik vor uns, deren bisherige Entwicklung sich innerhalb einer Generation abgespielt hat, und sie trägt sonach mehr das Gepräge einzelner Persönlichkeiten als das bei anderen Zweigen der Technik der Fall ist. Es mag daher reizvoll erscheinen, einen Rückblick auf den Werdegang dieser Technik zu werfen und dabei der Persönlichkeiten, der Entwicklungsstellen und der dort geschaffenen Hilfsmittel zu gedenken, kann doch aus einem solchen Rückblick mancher aus der jüngeren Generation der Hochspannungstechniker Anregung und Zuversicht schöpfen. Der Verfasser dieser Zeilen hatte das Glück, vor mehr als 40 Jahren seine Laufbahn in der Hochspannungstechnik beginnen zu können, die damals gerade aus dem Stadium des ersten tastenden Probierens heraustrat, und seine Tätigkeit spielte sich in einem Kreis ab, der, wie sich zeigen wird, wesentlich an der Entwicklung dieser Technik zu ihrer heutigen stolzen Höhe beteiligt war.

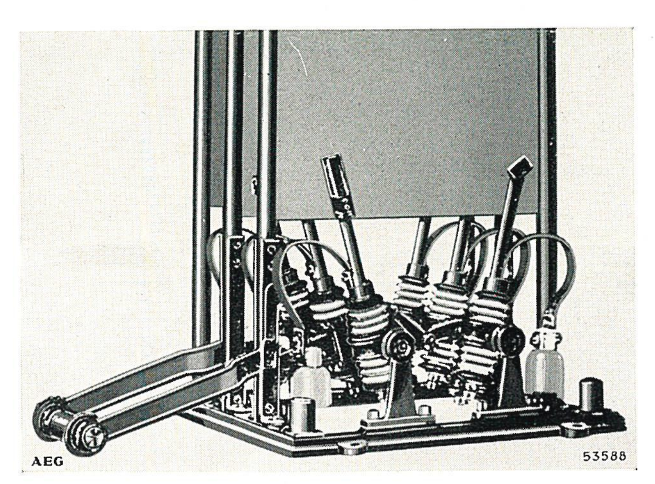


Bild 1. AEG-Hebelschalter 4000 V aus dem Jahre 1904

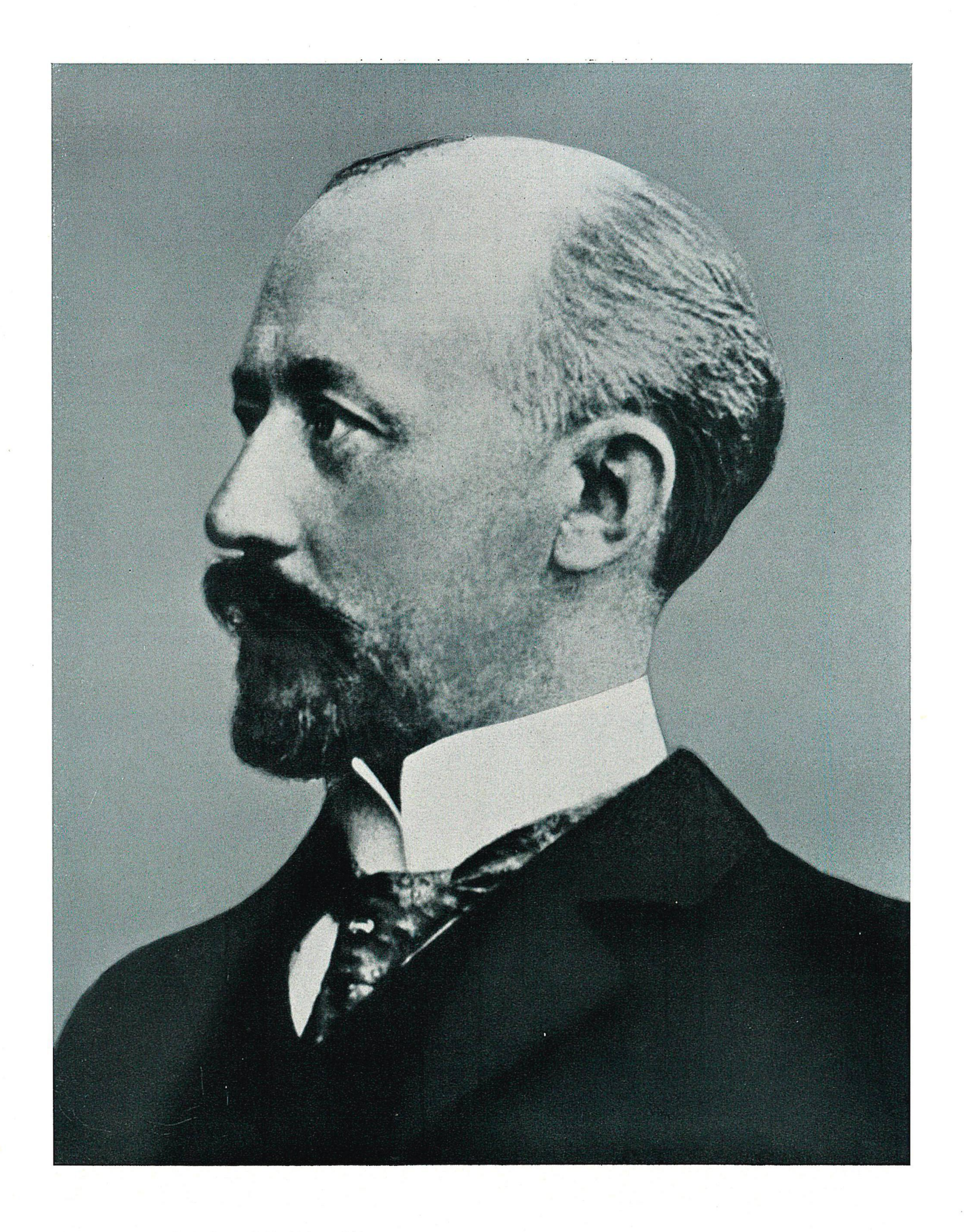
Wenn sich die nachfolgenden Betrachtungen nur auf den Arbeitskreis beziehen, der im Rahmen der AEG tätig war, so soll das keine Schmälerung der Verdienste anderer Stellen sein. Der Verfasser will nur von den Männern berichten, die er persönlich gekannt hat und von deren Anteil an der Entwicklung er aus eigener Anschauung weiß.

Wie so häufig, hat man anfangs auch in der Hochspannungstechnik geglaubt, mit einer storchschnabelartigen Vergrößerung der von der Niederspannungstechnik her bekannten Konstruktionen auskommen zu können. Ein Hebelschalter für 4000 V, mit dem man auch Leistungen unterbrechen wollte, unterschied sich im Aufbau zunächst nicht von einem Niederspannungshebelschalter (Bild 1). Wir dürfen uns nicht darüber wundern, daß dieser Schalter beim Abschalten von Kurzschlußströmen versagte. Dolivo-Dobrowolski schuf 1900 die Entionisierungskammer, die auch heute noch bei Gleich- und Wechselstromschaltern eine große Rolle spielt. Sie kam damals bei den Wechselstrom-Hochspannungsschaltern nicht mehr zum Tragen, weil „unglücklicherweise" bald darauf der Ölschalter erfunden wurde.

Die ebenfalls der Kurzschluß-Abschaltung dienende Sicherung bestand damals aus einem einfachen, in freier Luft gespannnten Draht von solcher Länge, daß man beim Abschmelzen dieses Drahtes auf eine Unterbrechung des Stromkreises auch bei Betriebsspannungen von einigen Tausend Volt hoffen durfte. Man geriet mit diesen Drahtsicherungen bald in die Brüche, bis Fellenberg im Jahre 1903 die nach ihm benannte Sandsicherung entwickelte. Die Fellenberg-Patrone entsprach in ihrem prinzipiellen Aufbau ziemlich genau den heutigen Hochleistungssicherungen mit Sandfüllung und hat sich bis in die 20er Jahre hinein ausgezeichnet bewährt.

Die zunehmende Vermaschung der Hochspannungsnetze ließ bald das Bedürfnis nach selektiv wirkenden Schutzeinrichtungen für Maschinen, Transformatoren und Leitungen entstehen. Die Männer der AEG können es sich als Verdienst anrechnen, daß sie die Bedeutung des Merz-Price-Differential-Schutzes frühzeitig erkannt und diesen auch heute noch viel benutzten Schutz bereits 1905 in die Praxis eingeführt haben. Besonders K. Kuhlmann hat sich um die Entwicklung dieses Schutzes zu einem betriebstüchtigen Instrument großes Verdienst erworben.

Mit wachsender Betriebsspannung stellten sich bei den Isolatoren, insbesondere den Durchführungen, bald ernste Schwierigkeiten ein. Man hatte die Isolatoren einfach von der Niederspannungstechnik entlehnt und beispielsweise eine Hochspannungsdurchführung als massiven zylindrischen Porzellankörper



Michael von Dolivo-Dobrowolski
geboren 3. Januar 1862, Odessa, gestorben 15. November 1919, Heidelberg

von kleinem Durchmesser ausgebildet. Eine noch so starke Vergrößerung der Länge sowie die Anbringung zahlreicher Rillen konnten nicht verhindern, daß schon bei niedrigen Spannungen Gleitfunken an der Fassung auftraten, die bald zum Überschlag führten. Kuhlmann kam um 1905 zu der Erkenntnis, daß es darauf ankomme, die elektrische Feldstärke der Fassung zu verringern, und gab in folgerichtiger Ausnutzung dieser Erkenntnis der Durchführung die heute übliche Form.

Im Jahre 1910 erhielt die AEG den Auftrag zur Elektrifizierung der am Randgebirge gelegenen südafrikanischen Minen. Dabei wurde ein für die damaligen Verhältnisse geradezu gigantisches Kraftwerk mit fünf Turbosätzen von je 18 MVA errichtet, das über ein 40 kV-Freileitungsnetz die angeschlossenen Minen mit elektrischer Energie versorgte. Damit trat an die kurz vorher gegründete, von G. Stern geleitete Hochspannungsfabrik der AEG die Frage nach der Größe der diesen Maschinen vorzuschaltenden Transformatoren heran. Das Risiko, bei einer so hohen Spannung von einer Einheitsleistung von 7 MVA mit einem Schritt auf 18 MVA zu gehen, erschien allzu groß. Man wandte sich daher um Rat an den großen C. P. Steinmetz der General Electric Co., mit der die AEG dank der weitsichtigen Politik Emil Rathenaus schon damals im Erfahrungsaustausch stand. Steinmetz kabelte zurück, daß er dringend davon abrate, diese Leistung in einer Einheit unterzubringen; bei so großen Transformatoren läge ihre elektrische Eigenschwingungszahl so niedrig, daß Resonanzgefahr mit Oberschwingungen der Netzspannung bestünde. Man folgte diesem Rat und schaltete je Generator zwei Transformatoren mit je 9 MVA parallel.

Schienen so die den Transformatoren drohenden Gefahren gebannt, so kamen doch bald nach der Inbetriebsetzung aus Südafrika Hiobsbotschaften. Man hatte im Kraftwerk, wie man es damals nicht anders wußte, alle vorhandenen Generatoren auf die Sammelschienen geschaltet, und an diesen traten nunmehr Kurzschlußleistungen auf, denen die damaligen sogenannten Serienölschalter bei weitem nicht gewachsen waren. Es ereigneten sich so schwere Explosionen sowohl der Schalter als auch ihrer Zellen, daß — wie es in einem der damaligen Telegramme hieß — sogar dicke Betonmauern verrückt wurden, was natürlich räumlich zu verstehen ist.

Diese und andere Vorfälle ließen bei der AEG den Entschluß zur Errichtung eines Hochleistungsversuchsfeldes reifen, das im Jahre 1912 erstellt wurde (Bild 2). Es blieb 10 Jahre lang das einzige seiner Art im gesamten In- und Ausland. Um diese Zeit war auch die von Hilliard erfundene Löschkammer bekannt geworden, deren vorzügliche Wirkung im neuen Hochleistungsversuchsfeld unter Beweis gestellt werden konnte. Die Löschkammer hat wohl am meisten geholfen, das Ölschalterproblem einer Lösung ent-

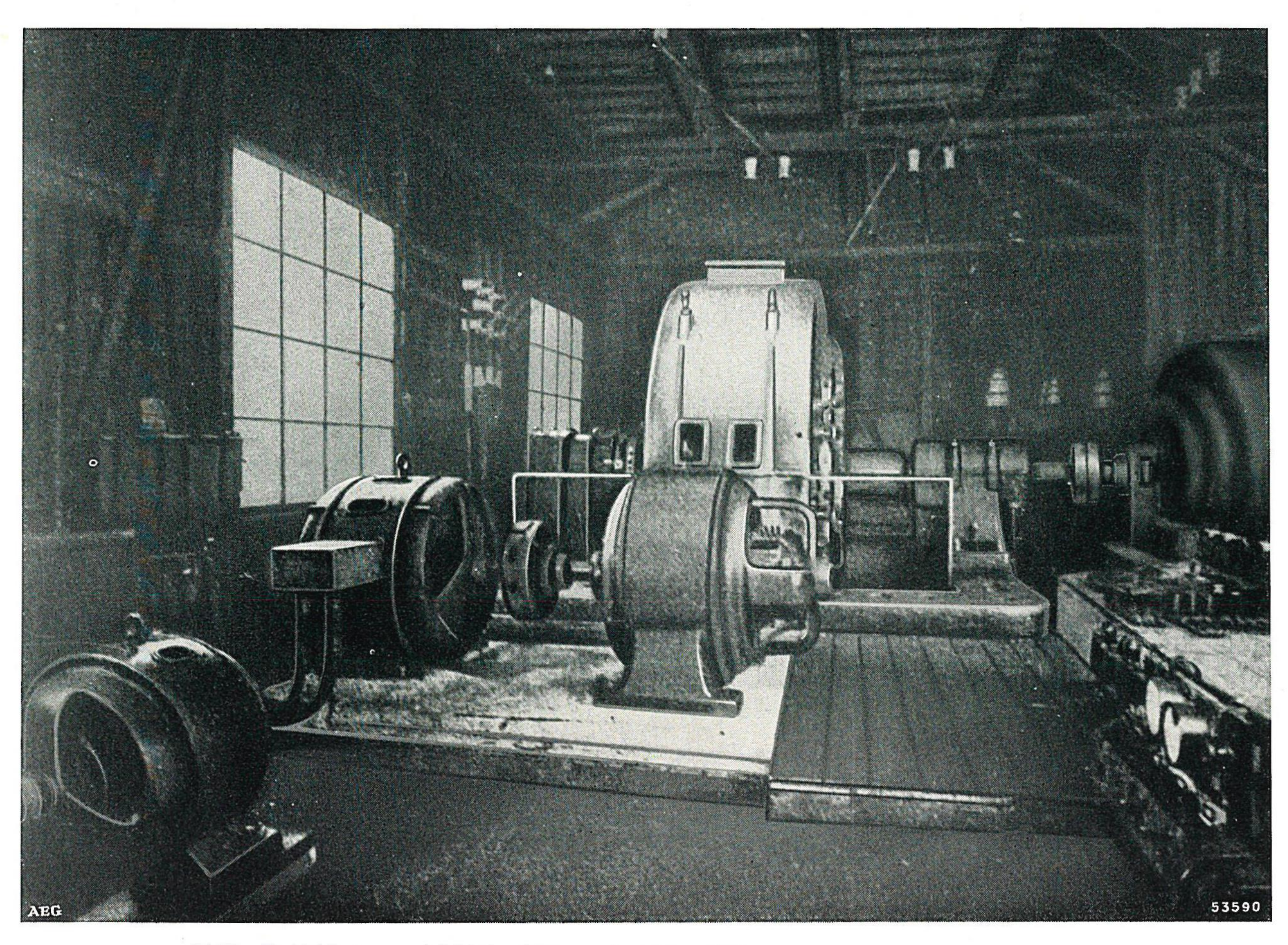


Bild 2. Hochleistungsversuchsfeld der AEG aus dem Jahre 1912



Georg Klingenberg
geboren 28. November 1870, Hamburg, gestorben 7. Dezember 1925, Berlin

gegenzuführen, um so mehr als wir[1]) nachweisen konnten, daß durch eine Kombination von Löschkammern und Schnellkontakten bei den größten, damals zur Verfügung stehenden Leistungen Lichtbogenzeiten von nur einer Halbwelle sicher erreichbar waren. Diese Kombination hat sich auf die Dauer als außerordentlich fruchtbar erwiesen, und es ist nicht zu viel behauptet, daß alle heutigen modernen Flüssigkeitsschalter auf diesem Prinzip beruhen.

Es ist von großem Interesse, heute rückblickend festzustellen, daß die Einführung der Löschkammer in die Praxis den größten Schwierigkeiten begegnete, obwohl es sich hier um leicht zu übersehende und ebenso leicht feststellbare Tatbestände handelt. Die Löschkammer hatte aus Amerika den unglücklichen Namen „Explosion Chamber" mitgebracht, und so wurde behauptet, die Löschkammer unterbräche die hohen Ströme im Scheitelwert ihres sinusförmigen Verlaufes und erzeuge somit ungeheure Überspannungen. Es hat Jahre gedauert, bis diese irrige Meinung verschwand.

Es traf sich gut, daß um die gleiche Zeit die Betonreaktanz übernommen und in die deutsche Praxis eingeführt werden konnte, die ein betriebssicheres Mittel zur Begrenzung der Kurzschlußströme auf auch für die übrigen Anlageteile erträgliche Höhe ist. Bei der Betondrosselspule haben wir den seltenen Fall vor uns, daß eine Konstruktion sich 40 Jahre lang unverändert erhalten hat und in diesem Zeitraum von keiner bekannt gewordenen Konstruktion übertroffen wurde.

Neben der bisher geschilderten mehr empirischen Entwicklung fand aber auch die Pflege der Theorie eine Heimstätte bei der AEG. Gemessen am damaligen Stand der Erkenntnis konnte von Autoren wie L. Dreyfuß[2]), W. Linke[3]) und dem Verfasser das Wesen der Kurzschlußvorgänge in Maschinen, Transformatoren und elektrischen Verteilungsnetzen weitgehend geklärt sowie Höhe und Verlauf des Kurzschlußstromes der rechnerischen Erfassung zugänglich gemacht werden. Diese Arbeiten[4]) erstreckten sich auch auf die beim einphasigen Kurzschluß zu erwartenden Überspannungen, ferner auf die mechanischen[5]) und thermischen[6]) Wirkungen der Kurzschlußströme, so daß man nunmehr die im Gefolge der magnetischen Ausgleichsvorgänge auftretenden Erscheinungen genau so beherrschen lernte, wie dies bei dem normalen Betriebsverhalten der Fall war.

Die Entwicklung der Stromerzeugungs- und -verteilungsanlagen wurde schon damals durch G. Klingenberg und H. Probst nachhaltig beeinflußt. Klingenberg hat der Entwicklung der Kraftwerke zum heutigen Großkraftwerk seinen Stempel aufgedrückt. Zwischen dem ersten, nach seinen Ideen im Jahre 1913 gebauten Kraftwerk Heegermühle des Märkischen Elektrizitäts-Werkes und dem dank seiner weitsichtigen Planung im Jahre 1925 noch gerade rechtzeitig enstandenen Großkraftwerk Klingenberg der Berliner Elektrizitäts-Werke liegt der Lebensweg dieses leider zu früh verstorbenen Mannes, der auch andere Gebiete der Übertragungstechnik nachhaltig befruchtet hat. So dürfte z. B. wenig bekannt sein, daß der bei gekapselten Schaltgeräten zur Anwendung kommende fahrbare Schaltwagen von Klingenberg stammt. Unter Klingenberg entstand auch 1917 die Leitung Zschornewitz-Berlin, welche die erste der Groß-Energieübertragung dienende 110 kV-Leitung darstellt.

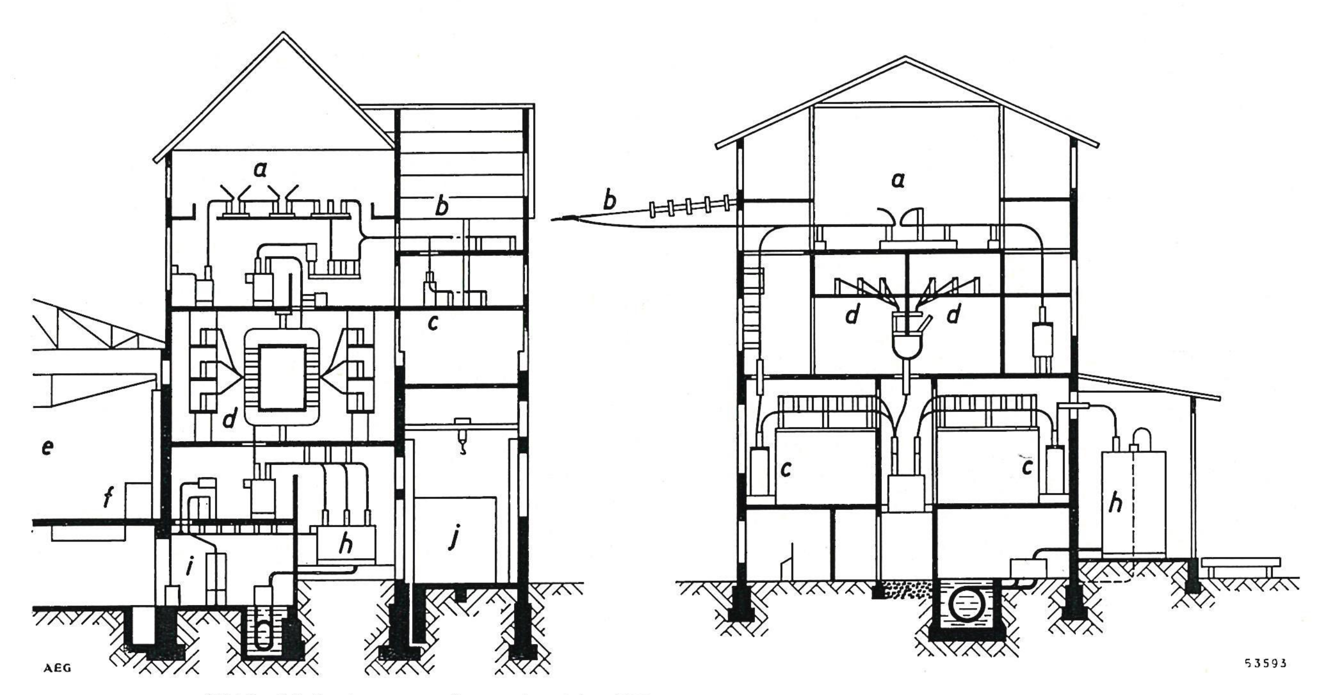


Bild 3. Schaltanlagenentwürfe aus dem Jahre 1910

Links: Schalt- und Transformatorenhaus der Zentrale Lauchhammer, rechts: Schalt- und Transformatorenhaus der Unterstation Gröditz (Entwurf Probst)

a) Hörnerboden
b) Fernleitungen
c) Stromwandler
d) 110 kV-Sammelschiene
e) Maschinenhaus
f) Hauptschalttafel
h) Haupttransformator 5/110 kV
i) 5 kV-Sammelschiene
j) Reparaturraum



Waldemar Petersen
geboren 10. Juni 1880, Athen, gestorben 27. Februar 1946, Darmstadt

H. Probst kann als der Schöpfer der modernen Schaltanlage bezeichnet werden, und die sogenannte klassische Bauweise sollte gerechterweise in Probst'sche Bauweise umbenannt werden. Von seiner weit vorausschauenden Planung bekommt man einen Eindruck, wenn man in einem 1911[7]) erschienenen Aufsatz die Bilder 20 und 35 (Bild 3) vergleicht und feststellen muß, daß die damals von Probst entworfene Schaltanlage sich im wesentlichen nicht von der heutigen klassischen Bauform unterscheidet. Nach Probst'schen Entwürfen wurde auch die erste in Deutschland errichtete Freiluftschaltanlage Mariendorf bei Berlin gebaut. Die in dieser Station verwendeten Hochspannungsapparate wurden nach einem Vorschlag des Verfassers mit den später allgemein verwendeten Koordinierungs-Funkenstrecken ausgerüstet. Um deren Normung durch den VDE zu ermöglichen, hat die AEG das auf diese Funkenstrecken angemeldete Patent fallen lassen.

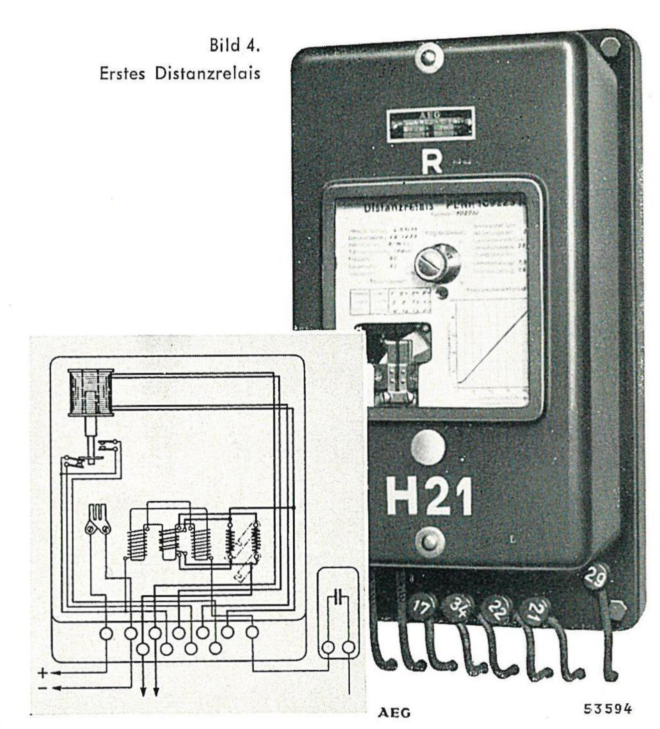


Bild 4. Erstes Distanzrelais

Zur damaligen Zeit litten die Hochspannungsnetze sehr stark unter dem sogenannten intermittierenden Erdschluß, der nicht nur unmittelbare Betriebsstörungen, sondern infolge der auftretenden Überspannungen auch zahlreiche mittelbare Störungen nach sich zog. Selten ist in der Technik ein Problem mit einem Schlage so vollkommen gelöst worden wie die Erdschlußfrage im Jahre 1917 von W. Petersen durch die Erfindung der Erdschlußspule, die nach ihm benannt wird. Ihr folgte ein Jahr später das wattmetrische Erdschlußrelais, das die Feststellung des erdschlußbehafteten Anlageteiles ermöglichte. Erst kürzlich war in einer amerikanischen Veröffentlichung zu lesen, daß in den USA., wo die starre Nullpunktserdung vorherrscht, die Petersenspule in stetigem Vordringen begriffen sei. Wenn heute in zwei großen 220 kV-Netzen die Petersenspule der starren Nullpunktserdung weicht, so heißt das bloß, daß auch die Petersenspule Anwendungsgrenzen hat.

Die Petersenspule hat das Entstehen vieler Kurzschlüsse von vornherein verhindert. Trotzdem waren die damaligen Hochspannungsnetze noch störanfällig genug, um den Wunsch nach selektiv wirkenden Auslöserelais immer lauter werden zu lassen; die damals üblichen unabhängigen, stromabhängigen und spannungsabhängigen Überstromrelais konnten in keiner Weise befriedigen; der allein selektiv wirkende Differentialschutz wurde in weitgehendem Maße in Kabelnetzen angewendet, seine Verwendung in Freileitungsnetzen scheiterte aber an technischen und wirtschaftlichen Schwierigkeiten. Gestützt auf theoretische Vorarbeiten, gelang dem Verfasser im Jahre 1922 die Entwicklung eines Selektivrelais[8]), das die Prinzipien der Strom-, der Spannungs- und der Stromrichtungsabhängigkeit in sich vereinigte und als sogenanntes Distanzrelais bald seinen Siegeszug antrat (Bild 4). Die Weiterentwicklung des Distanzschutzes, an der auch O. Mayr maßgebend beteiligt war, verlangte weitere theoretische und experimentelle Untersuchungen über das Verhalten der Netze bei Doppelerdschlüssen sowie Lichtbogenkurzschlüssen. Sie führte, nachdem die auch heute noch üblichen Sparschaltungen gefunden waren, zu der jetzigen Form der Selektivschutztechnik, die auch in schwierigen Fällen allen üblichen Ansprüchen genügt. Da es erst durch den Distanzschutz möglich wurde, bisher offen betriebene Ringleitungen zu schließen und damit Reflektionspunkte für Überspannungswellen zu beseitigen, hat dieser auch in überspannungstechnischer Hinsicht Vorteile gebracht. Es ist rückblickend schwer zu verstehen, daß die uns heute so selbstverständlich anmutende Lösung des Selektivschutzes durch das Distanzrelais bei der Einführung in die Praxis schärfsten Anfeindungen begegnete. „Nur ein Anfänger im Relaisbau kann auf die Idee kommen, so komplizierte Relais in die Praxis einführen zu wollen", hieß es beispielsweise in einer Propagandaschrift aus jener Zeit. Dabei war das erste von der AEG herausgebrachte Distanzrelais, das nur zwei Kontakte besaß, verglichen mit den heutigen Konstruktionen, einfach genug.

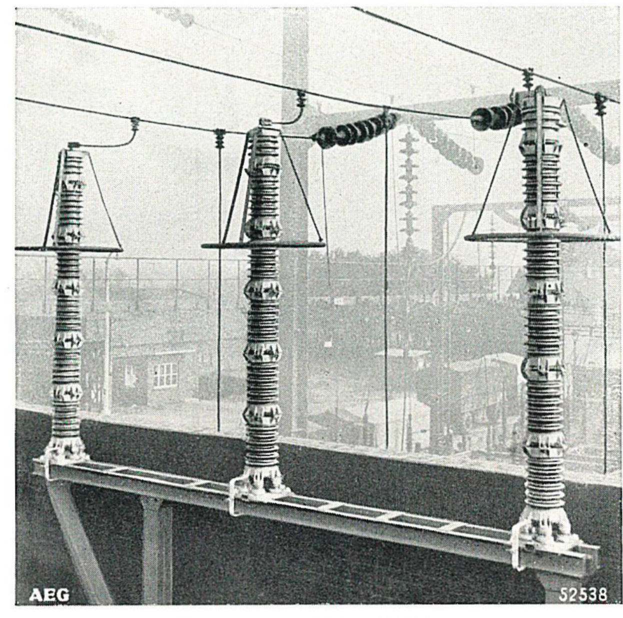


Bild 5. Moderner Überspannungsableiter 110 kV

Noch Anfang der zwanziger Jahre betrachtete man Gewitterüberspannungen als höhere Gewalt, denen unsere Hochspannungsnetze schutzlos preisgegeben waren. Die damals bekannten Überspannungsableiter in Form von Hörnerableitern mit hochohmigen Dämpfungswiderständen oder auch die späteren Bendmannableiter konnten bestenfalls als Überspannungsanzeiger gelten, obwohl ihnen in den damaligen Schaltanlagen ein ganzes Stockwerk eingeräumt wurde (s. Bild 3). Im Jahre 1925 ließen wir die damals bekanntgewordenen Stabwiderstände mit spannungsabhängiger Charakteristik in die Bendmannableiter einbauen[9]. Kurz darauf ersetzte O. Mayr den Mechanismus des Bendmannableiters durch eine Löschfunkenstrecke. Die im Forschungsinstitut der AEG durchgeführte Entwicklung kaltgepreßter, spannungsabhängiger Widerstandsscheiben mit verstärkter Spannungsabhängigkeit führte dann unter wesentlicher Mitwirkung von R. Willheim und G. Frühauf zur Schaffung des Überspannungsableiters mit Löschfunkenstrecke[10]) in der heute allgemein verbreiteten Form (Bild 5). Schon im Jahre 1915 hatte G. Stern die Sprungwellenprobe bei Transformatoren vorgeschlagen und zehn Jahre später ihren Einbau in die VDE-Vorschriften erreicht. Hierdurch wurden unzweckmäßige oder mangelhafte Isolationsausführungen im Prüffeld ausgemerzt, so daß letzten Endes eine wesentliche Erhöhung der Widerstandsfähigkeit von Transformatoren gegen Gewitterüberspannungen erzielt wurde.

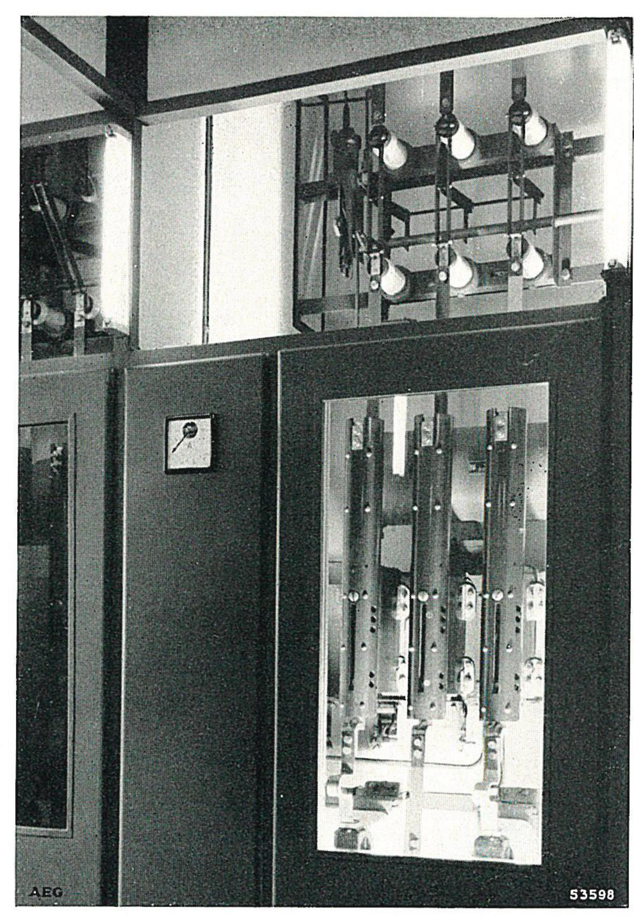


Bild 7. AEG-Druckgasschalter Reihe 10, 200 MVA

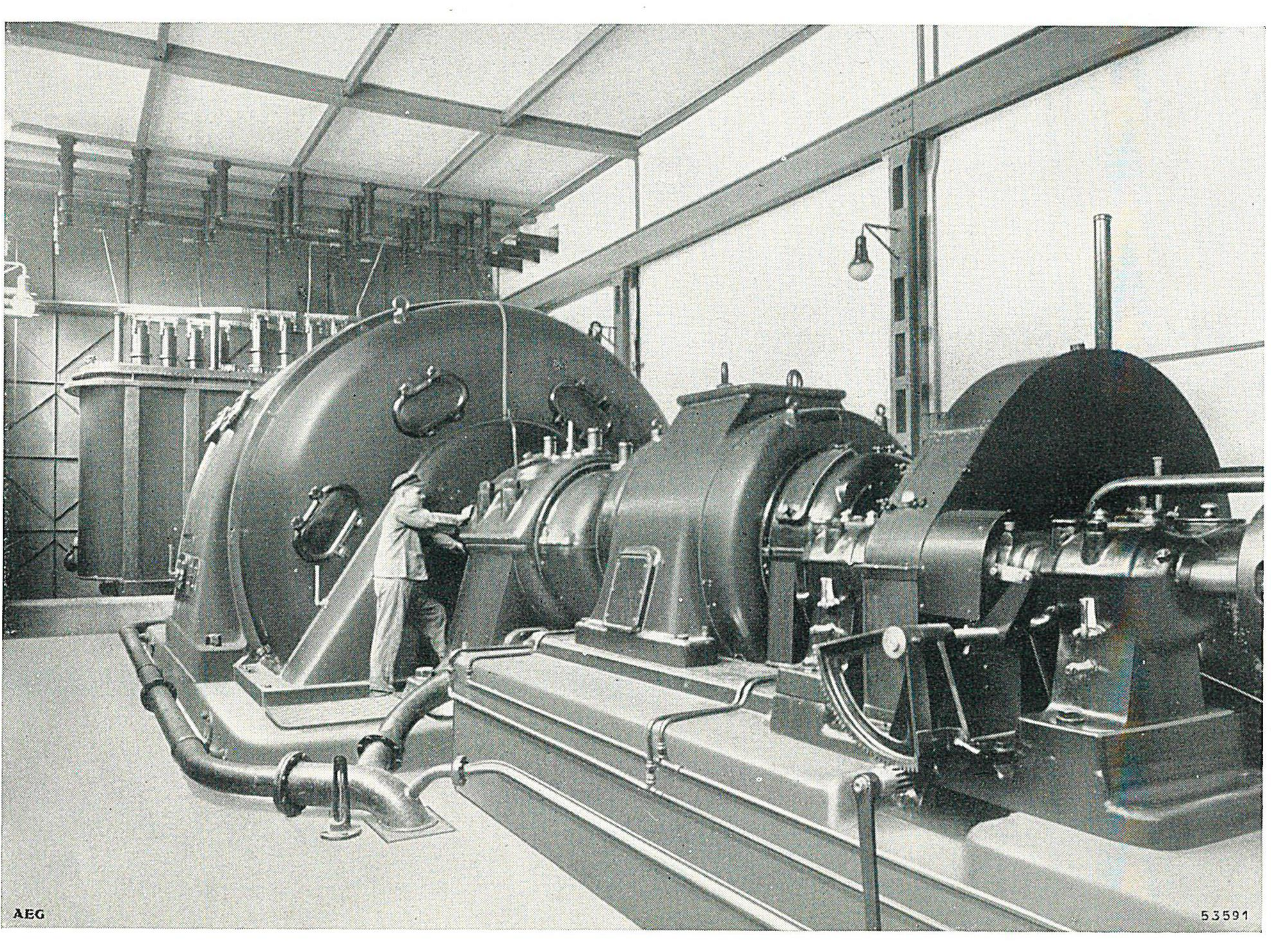


Bild 6. Hochleistungsversuchsfeld der AEG aus dem Jahre 1927

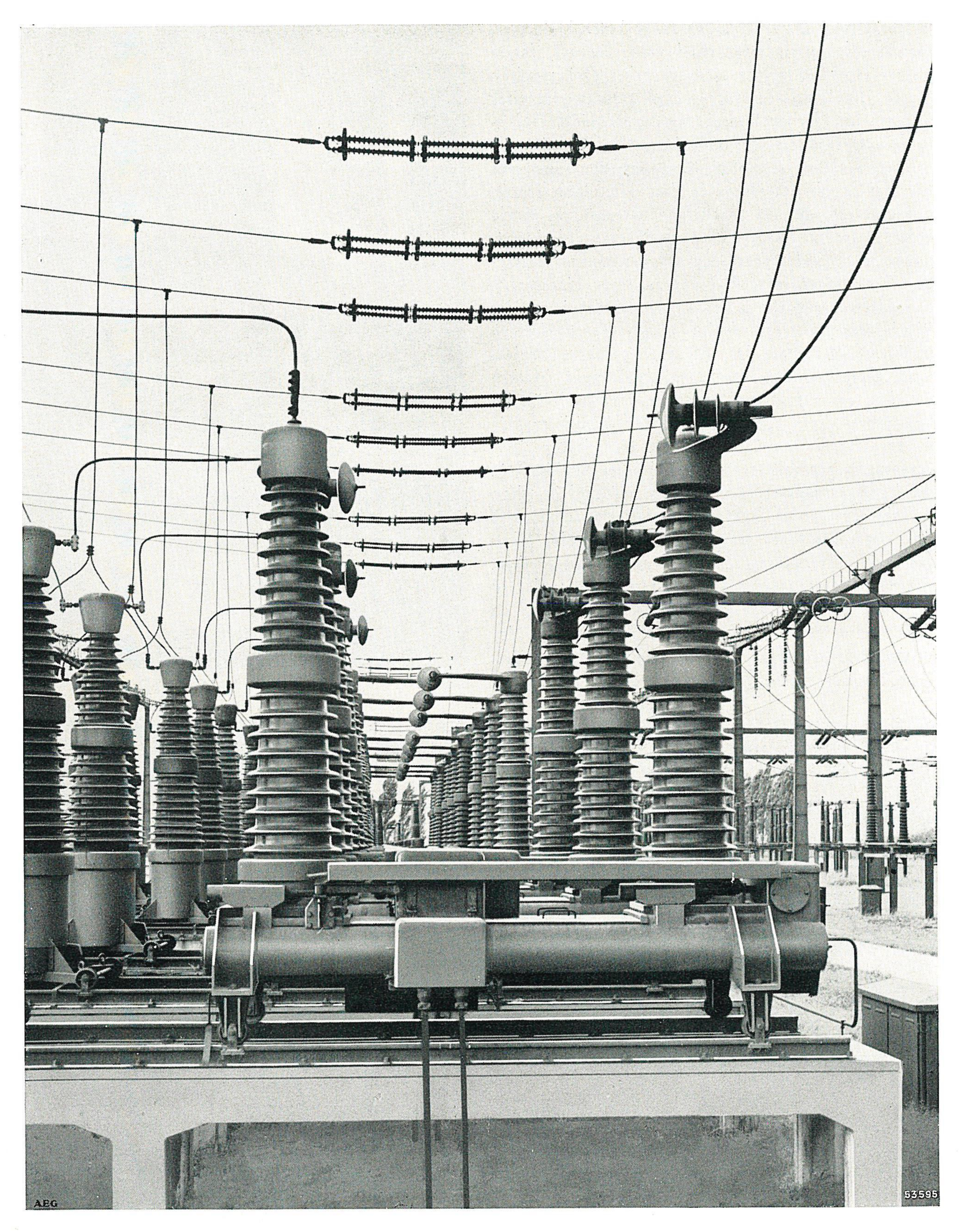
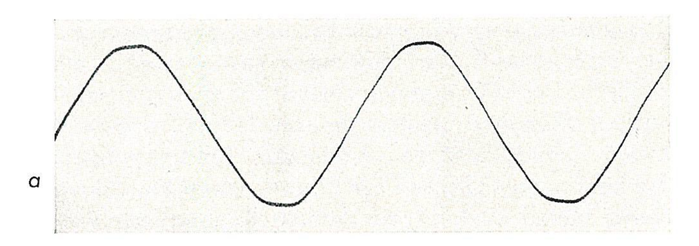


Bild 8. Freistrahlschalter
im 220 kV-Umspannwerk Lehrte der Preußischen Elektrizitäts-Aktiengesellschaft

Die Kurzschlußleistungen der Netze waren mittlerweile immer weiter angestiegen. Schwerste Störungen an Ölschaltern und Schaltanlagen, die auch Menschenleben forderten, häuften sich derart, daß beispielsweise der damalige Direktor der Berliner Elektrizitäts-Werke für den Schöpfer des ersten marktfähigen öllosen Schalters einen Preis aussetzte.
Die Entwicklung der öllosen Schalter begann im Jahre 1926 damit, daß wir einen normalen dreipoligen Ölschalter der Reihe 10 mit destilliertem Wasser füllten und Kurzschlußversuchen unterwarfen. Der Schalter verhielt sich gegenüber einer Füllung mit Öl so günstig, daß sofort weitere Versuche in Angriff genommen wurden, und zwar stellte man einen Löschkammerschalter ohne Kessel auf den Kopf und füllte die gut abgedichtete Löschkammer mit destilliertem Wasser. Der zunächst allzu große Wasserverlust konnte leicht durch Anordnung einer Vorkammer auf der Löschkammer beseitigt werden, womit der Wasserschalter in seiner heutigen Form geschaffen war.
Die Unmöglichkeit, mit Wasser auf höhere Betriebsspannungen als etwa 30 kV zu kommen, und das günstige Verhalten einer von S. Ruppel für Überspannungsableiter vorgeschlagenen druckluftbeblasenen Löschfunkenstrecke bewogen die AEG, die weitere Entwicklung des öllosen Schalters, an der neben dem Verfasser vor allem noch G. Stern, R. Willheim, O. Mayr, F. Petermichl und W. Übermuth beteiligt waren, auf der Basis des Druckgasschalters fortzuführen. Im Verein mit der theoretischen Durchdringung der Lichtbogenlöschung[11]) konnten in wenigen Jahren mit Hilfe des inzwischen wesentlich vergrößerten neuen Hochleistungsversuchsfeldes (Bild 6) Schaltertypen geschaffen werden (Bilder 7 und 8), auf denen noch die heutige Entwicklung aufbaut. Für die Untersuchung der großen Leistungen war eine neue Kunstschaltung[12]), die eine Verdoppelung der Prüffeldleistung ergab, eine große Hilfe.
Wie so ziemlich jede der im vorhergehenden erwähnten Neuerungen, so begegnete auch die Einführung des Druckgasschalters in die Praxis zunächst großen Widerständen, und es ist typisch, daß auch hier solche Eigenschaften von vornherein als besonders schlecht hingestellt wurden, die durch die späteren Betriebserfahrungen sich als ganz besondere Vorteile der Neuerung erwiesen.
Es ist bemerkenswert und für die nachdrängende Generation sehr lehrreich, daß sprunghafte Vergrößerungen der Leistung von Maschinen, Transformatoren und Apparaten oder der angewendeten Betriebsspannung zu schweren, ganz unerwarteten Rückschlägen führen können, weil hierbei Schwächen der Konstruktion oder Ausführung, die vorher keinerlei praktische Bedeutung gewinnen konnten, nun mit einem Male lebensbedrohende Folgen zeitigen. Das zeigte sich zum Beispiel im Transformatorenbau, als im Jahre 1916 die Leistung der für das Kraftwerk Zschornewitz bestimmten Transformatoren von bis dahin etwa 10 MVA plötzlich auf 22 MVA gesteigert werden mußte. Am Eisenkern dieser Transformatoren traten bald nach der Inbetriebsetzung schwere Eisenbrände auf, deren Ursachen durch von L. Schätz erarbeitete sorgfältige Fabrikationsmethoden bekämpft werden konnten. Das damals von der AEG bezahlte Lehrgeld ist in der folgenden Zeit auch anderen Firmen nicht erspart geblieben, und auch die Generatorenbauer mußten das gleiche erleben.
Das ständige Anwachsen der Betriebsspannungen und der verlangten Einheitsleistungen sowie endlich die Forderung nach Eisenbahntransportfähigkeit betriebsfertiger Einheiten stellten an die Transformatorenbauer ununterbrochen steigende Anforderungen. Die Spannungssicherheit der Oberspannungswicklung wurde durch eine bis zur letzten Konsequenz vorgenommene Trocken- und Vakuumbehandlung des fertigen Transformators verbessert, wobei das Sprühverfahren unter Vakuum nach L. Schätz eine weitgehende Schonung des Öles gewährleistete. Die Auswahl und die Behandlung des Öles und der für den Transformator verwendeten Baustoffe mußte so gesteuert werden, daß Versäuerungs- und Verschlammungserscheinungen des Öles auch nach langjähriger Betriebszeit vermieden wurden. Eine weitere Verbesserung der Spannungssicherheit von Höchstspannungstransformatoren konnte durch Einführung der freien Ölstrecke, d. h. durch Fortlassen aller Abstützteile zwischen Ober- und Unterspannungswicklung, erreicht werden, so daß ein unmittelbarer Durchschlag zwischen beiden Wicklungen durch festes Material hindurch, also vor allem der Wärmedurchschlag, unmöglich gemacht war. Man konnte sich zu diesem immerhin gewagten Schritt nur deshalb entschließen, weil durch theoretische Untersuchungen[13]) festgestellt worden war, daß die in radialer Richtung wirkenden Kurzschlußkräfte sowohl bei einfach- als auch bei mehrfach-konzentrischer Wicklung eine zentrierende Wirkung auf die Oberspannungswicklung ausüben.
Die mit wachsender Betriebsspannung fortschreitende Verfeinerung der Trockenbehandlungsmethode brachte es mit sich, daß ein immer stärkeres Bedürfnis nach dem Versand betriebsfertiger Transformatoren entstand. Dieser Forderung kam G. Stern mit der Einführung des fünfschenkeligen Eisenkernes bei Drehstromtransformatoren entgegen, der fast eine Halbierung der Jochhöhe und damit eine fühlbare Verringerung der Höhe des Transformators brachte. Weiterhin konnte durch Einführung neuer Isoliermethoden, wie des Winkelringes von A. Hundt[14]) und Isolationsmaterialien, insbesondere der Weichpapierisolation durch den Verfasser, der Isolationsabstand zwischen Ober- und Unterspannungswicklung während der Jahre 1920 bis 1935 auf etwa den vierten Teil reduziert werden. Von L. Schätz stammt der Gedanke, an Stelle der einzelnen Winkelringe am Ende der Wicklung die begrenzenden Flansche durch Umreißen der zwischen den Spulen verwendeten Papierisolation herzustellen. Bezeichnend für den erzielten Fortschritt ist, daß man im Jahre 1920 Transformatoren für 100 kV Betriebsspannung und 20 MVA Dauerleistung noch mit abgenommenem Joch in einem besonderen Transportkasten versenden mußte, während heute Transformatoren für 220 kV Betriebsspannung und 200 MVA

Dauerleistung komplett bahntransportfähig gebaut werden können. Dazu kommt, daß derartige Transformatoren heute als gewittersicher anzusehen sind, was von den damaligen Transformatoren in keiner Weise behauptet werden kann.

a



b

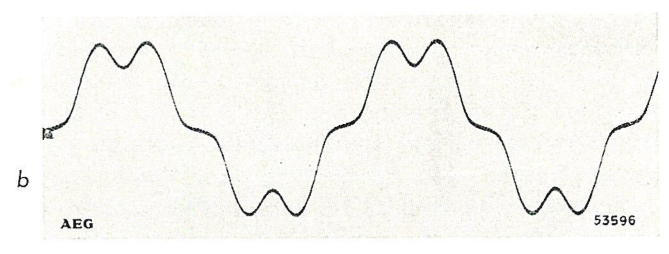


Bild 9. Leerlaufstrom eines 120 MVA-Wandertransformators
a) mit Kompensationswicklung
b) ohne Kompensationswicklung

Die Einführung der Lagenwicklung in den Großtransformatorenbau durch den Verfasser im Jahre 1934 brachte Verbesserungen bezüglich der Überspannungs- und der Kurzschlußfestigkeit und eine weitere Verringerung der Abmessungen. Die Lagenwicklung ist heute auch in den USA verbreitet. Die General Electric Co. gab bekannt, daß sie im vergangenen Jahr Transformatoren mit einer Gesamtleistung von 2,5 Millionen kVA mit Lagenwicklung ausgerüstet habe und daß sie bei Betriebsspannungen von 150 kV an ausschließlich die Lagenwicklung anwende.

Transformatoren verseuchen durch die in ihrem Magnetisierungsstrom enthaltene fünfte Oberwelle die Spannungskurve unserer großen Hochspannungsnetze. Seit langem gehen daher die Bemühungen dahin, die Oberwellen aus dem Magnetisierungsstrom zu entfernen, diesen also möglichst sinusförmig zu gestalten. Zu diesem Zweck wurden zwei Verfahren entwickelt, das der Verwendung eines Hilfsschenkels nach E. Hueter und R. Buch [15]), welches aber Dreieckschaltung einer der Arbeitswicklungen ausschließt und das der magnetischen Stern-Dreiecks-Schaltung nach R. Willheim, W. Krämer und dem Verfasser[16]). Bild 9 läßt erkennen, wie weit der erstrebte Zweck bei dem Eisenkern eines 120 MVA-Transformators erreicht werden konnte.

Da für die Entwicklungen auf dem gesamten Hochspannungsgebiet nicht immer die erforderlichen Prüfeinrichtungen existierten, mußten diese häufig erst geschaffen werden. Hier sei beispielsweise der von R. Crämer entwickelte Stoßgenerator erwähnt, der nicht nur in den eigenen Laboratorien der AEG, sondern auch an vielen anderen Stellen gute Dienste leistet. R. Crämer hat schon im Jahre 1920 den Glimmring angegeben, der heute vielfach — insbesondere in Laboratorien und Prüffeldern — zur Anwendung kommt.

Dieser Überblick möge gezeigt haben, daß die AEG von Anfang an um die Entwicklung der Hochspannungstechnik bemüht war und wesentliche Beiträge dazu lieferte. Die Entwicklung wurde von Männern getragen, in denen sich theoretisches Wissen und experimentelles Können mit einem verantwortungsbewußten Wagemut vereinigten. Die nun folgenden Kapitel sollen zeigen, daß diese Tradition auch heute bei der AEG lebendig ist.

Unter den neuen Forschungsstätten der AEG nimmt das Hochspannungs-Institut nach Ausstattung und Bedeutung einen besonderen Platz ein. Die Angehörigen dieses Instituts betrachten es als ihre besondere Aufgabe, den in der Vergangenheit auf dem Gebiet der Hochspannungstechnik erzielten Erfolgen unserer Firma neue Erfolge hinzuzufügen.

Schrifttum

1) G. Stern u. J. Biermanns: Ölschalterversuche, ETZ 37 (1916) 46, S. 617—620 u. 47, S. 635—639.

2) L. Dreyfuss: Freie magnetische Energie zwischen verketteten Mehrphasensystemen, E u. M 29 (1911), S. 891 ff.

3) W. Linke: Über Schaltvorgänge bei elektrischen Maschinen und Apparaten, Arch. f. Elektrotechn. 1 (1912), S. 16 ff.

4) J. Biermanns: Der plötzliche einphasige Kurzschluß der Drehstromsynchronmaschinen, Arch. f. Elektrontechn. 3 (1915), S. 354 ff.

5) J. Biermanns: Kurzschlußkräfte an Transformatoren, Bull. SEV (1923), S. 212 ff.

6) J. Biermanns: Überströme in Hochspannungsanlagen, J. Springer, Berlin, 1926.

7) E. G. Fischinger: Die erste 110000-Volt-Anlage in Europa, ETZ 32 (1911) 33, S. 815—818, 34, S. 853—856 u. 35, S. 876—880.

8) J. Biermanns: Selektivrelais zum Schutze elektrischer Leitungen, DRP 390 280 vom 30. 5. 1922.

9) J. Biermanns: Überspannungsableiter, DRP 484 773 vom 1. 10. 1926.

10) J. Biermanns: Überspannungsableiter für elektrische Hochspannungsanlagen mit spannungsabhängigem Ableiterwiderstand, DRP 520 365 vom 16. 12. 1926.

11) O. Mayr: Beiträge zur Theorie des statischen und dynamischen Lichtbogens, Arch. f. Elektrotechn. 37 (1943) 12, S. 588—608, 20 B.

12) J. Biermanns: Verfahren zum Prüfen einpoliger Schalter mittels eines Drehstromgenerators, DRP 425 347 vom 7. 6. 1925.

13) J. Biermanns: Überströme in Hochspannungsanlagen, J. Springer, Berlin, 1926, S. 351.

14) A. Hundt: Isolationsanordnung für Hochspannungstransformatoren, DRP 591 328 vom 20. 2. 1925.

15) E. Hueter u. R. Buch: Anordnung zur Unterdrückung der Oberwellen fünffacher Frequenz im Magnetisierungsstrom von Drehstromtransformatoren, DRP 588 170 vom 10. 12. 1930.

16) J. Biermanns, W. Krämer u. R. Willheim: Anordnung zur Unterdrückung der fünften Harmonischen in einem Drehstromnetz, DRP 674 132 vom 30. 4. 1935 und andere.

ZWECK UND AUFGABE DES HOCHSPANNUNGS-INSTITUTES

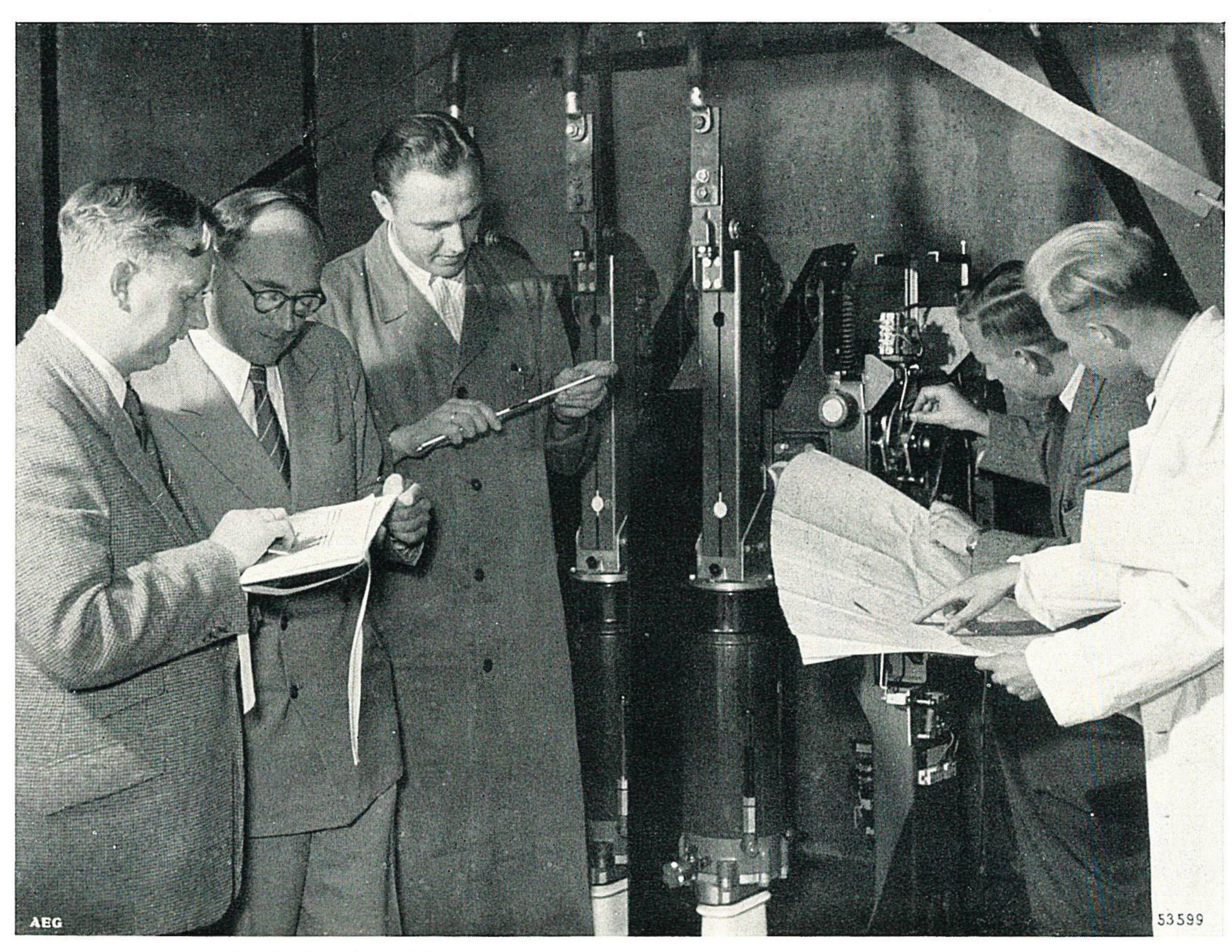
August Hochrainer

DK 061.5/.6 011.3

Niemand zweifelt daran, daß die deutsche Industrie ihre Weltgeltung außer dem Fleiß des deutschen Arbeiters vor allem der Forschungsarbeit deutscher Wissenschaftler verdankt, und doch gibt es auch heute noch, selbst in der Industrie, viele Stimmen, welche die Forschung den Hochschulen und staatlichen Instituten allein zuweisen wollen. Die Industrie hat ihrer Meinung nach zu produzieren, sie hätte weder Zeit noch Geld für die mühsame theoretische und experimentelle Untersuchung der Grundlagen. Diese Arbeit könne viel besser von den Wissenschaftlern der genannten Institute durchgeführt werden, die fern vom Getriebe der Gütererzeugung, vom Zwang der Preise und Lieferzeiten ihren Studien obliegen und diese dann durch ihre Veröffentlichungen der Allgemeinheit zugänglich machen. Da diese Kenntnisse und Erkenntnisse doch letzten Endes allen zugute kommen, so sei es auch die Aufgabe der Allgemeinheit, die Kosten dafür zu übernehmen.

In ihren Anfängen, vor hundert oder zweihundert Jahren, hatte die Industrie tatsächlich keine eigenen Forschungsstätten. Damals war es noch so, daß die Forschung an den Hochschulen allein betrieben wurde und die Industrie versuchte, die dort gewonnenen Erkenntnisse für ihre Produktion nutzbar zu machen. Wenn wir das hier interessierende Gebiet der Starkstromtechnik und besonders der Hochspannungstechnik betrachten, so sehen wir, daß sich vielleicht um die Jahrhundertwende erst allmählich industrielle Forschungsstätten zu entwickeln begannen, zuerst ganz klein und bescheiden in irgendeiner Ecke des Werkes und meist aus den Prüffeldern hervorgehend. Vielfach war es die Größe der herzustellenden Objekte, welche diese Entwicklung einleitete. Eine größere elektrische Maschine war einfach zu teuer, um sie nur als Versuchsobjekt herzustellen und dann an ihr in einem Hochschul-Laboratorium genauere Studien zu machen. Daher mußten die Messungen im Prüffeld der Fabrik an der zu liefernden Maschine gemacht werden. Um Unterlagen für weitere und größere Lieferungen zu gewinnen, machte man bei dieser Gelegenheit auch Messungen und Untersuchungen, die über die eigentliche Prüfung hinausgingen.

Je schwieriger und umfangreicher diese Arbeiten wurden, um so eher begann man die Prüfung von den Entwicklungs- und Forschungsarbeiten zu trennen,



Diskussion des Versuchsergebnisses

zunächst arbeitsmäßig, dann personell und schließlich auch räumlich. Bei den rotierenden elektrischen Maschinen blieb diese Entwicklung gewissermaßen stecken und wurde vielleicht sogar rückläufig. Der Grund dafür ist in dem schnellen und gründlichen Ausbau der Theorie der elektrischen Maschinen zu suchen. Diese Theorie erlaubt es, solche Maschinen mit derartiger Genauigkeit vorauszuberechnen, daß experimentelle Untersuchungen in großem Maßstab immer weniger notwendig wurden.

Schon bei den Transformatoren ist es anders; eine moderne Fabrik für Großtransformatoren muß über ein Laboratorium verfügen, in dem die mit der Hochspannung und mit der Erwärmung zusammenhängenden Fragen behandelt werden. Von ausschlaggebender Bedeutung sind die Forschungsinstitute auf dem Gebiet der Hochspannungstechnik, besonders bei den Fragen der Isolation und der Schalter.

Wohl verfügen die meisten Technischen Hochschulen auch über Hochspannungslaboratorien, aber diese können nur einen Bruchteil der auf diesem Gebiet zu leistenden Forschungsarbeit durchführen. Einer der Gründe hierfür ist darin zu sehen, daß sich die Hochspannungstechnik doch noch wenig der Theorie und Rechnung zugänglich zeigt. Es sind auch hier viele Erkenntnisse gewonnen worden, und so manche Frage konnte in ihren Grundlagen geklärt werden, aber diese Erkenntnisse können nur selten so verallgemeinert werden, daß die an einfachen Modellen gewonnenen Gesetze für die Berechnung der großen Erzeugnisse der Industrie ausreichen. Die Ergebnisse müssen vielmehr an diesen großen Stücken selbst gewonnen werden, und hier finden die Arbeiten der Hochschulinstitute ihre Grenze. Solche Aufgaben können nur von Instituten bewältigt werden, die in enger Verbindung mit der Fabrik arbeiten.

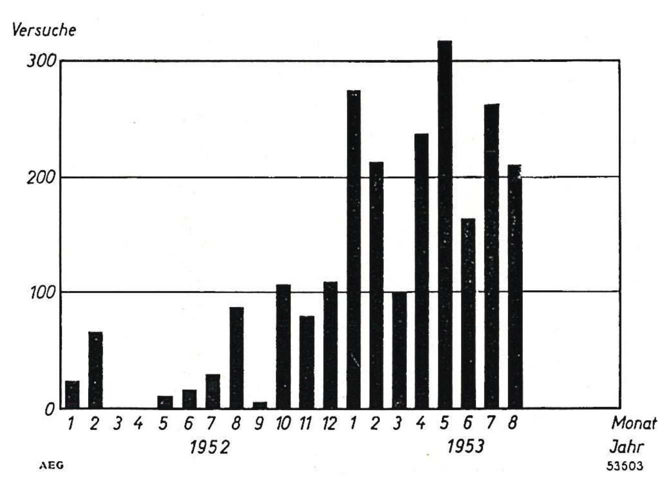
Schon der Transport der großen Objekte, seien sie nun für 110, 220 oder 380 kV, von dem Werk zu einer entfernten Hochschule verursacht beträchtliche Kosten. An solchen Apparaten kann auch nur selten ein geschlossenes Untersuchungsprogramm durchgeführt werden. Im Zuge der Messungen ergeben sich fortlaufend Änderungen im Aufbau, welche die Nähe einer mit dem Gerät genau vertrauten Werkstätte erfordern. Jedes der Zwischenergebnisse muß mit den Berechnern, Konstrukteuren und den Werkstättenleitern besprochen und erörtert werden, und jede Änderung verlangt die planmäßige Mitarbeit aller Stellen. Schriftliche Berichte und Diskussionen würden unerträgliche Zeitverluste mit sich bringen und können den Augenschein der persönlichen Anwesenheit bei den Versuchen nie ersetzen.

Es ist natürlich ausgeschlossen, die wertvollen und im Werk selbst dringend und laufend benötigten Fachleute zu oft Wochen dauernden Versuchsreihen irgendwohin zu entsenden. Die notwendige Zusammenarbeit läßt sich nur erreichen, wenn das Forschungsinstitut sich in unmittelbarer Nähe des Werkes befindet, so daß die betreffenden Stellen jederzeit zu den Versuchen gerufen werden können.

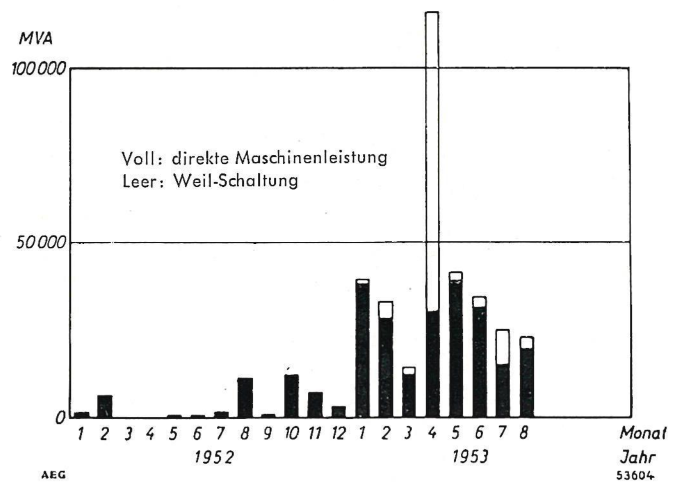
Am deutlichsten zeigen sich diese Anforderungen bei dem wohl schwierigsten Gerät der Hochspannungstechnik, dem Leistungsschalter. Zu den Fragen der elektrischen Festigkeit kommen hier die Probleme des elektrischen Lichtbogens, und daran schließen sich mechanische und strömungstechnische Probleme, die wieder zu werkstofftechnischen Aufgaben führen. Das Zusammenspiel aller dieser Wissensgebiete verlangt eine speziell entwickelte Meßtechnik. Der einzelne Fachmann kann nicht alle diese Gebiete beherrschen, sondern er ist auf die Mitarbeit von Spezialisten aus allen Teilgebieten angewiesen, von denen aber jeder nicht nur Spezialist auf seinem Gebiet sein darf, sondern auch die Nachbargebiete mehr oder weniger kennen muß. Nur die Zusammenarbeit aller dieser Männer kann dem Konstrukteur die Unterlagen liefern, die ihn befähigen, bessere und leistungsfähigere Geräte zu entwerfen.

Hinter all den technischen Problemen steht der Betrieb; er verlangt Rücksichtnahme auf vorhandene Fabrikationseinrichtungen und auf wirtschaftliche Fertigung. Hier handelt es sich nicht mehr darum, als einzelner Gelehrter den Geheimnissen der Natur nachzuspüren, sondern es zeigt sich der Zug der modernen Technik, daß weitere Fortschritte nur in wirklicher Gemeinschaftsarbeit aller Beteiligten vom theoretischen Physiker bis zum Werkstättenleiter erreicht werden können.

Es verlohnt sich, darüber ernsthaft nachzudenken, warum die Elektroindustrie, und zwar besonders die



Zahl der durchgeführten Kurzschlußversuche



Summe der geschalteten Kurzschlußleistungen



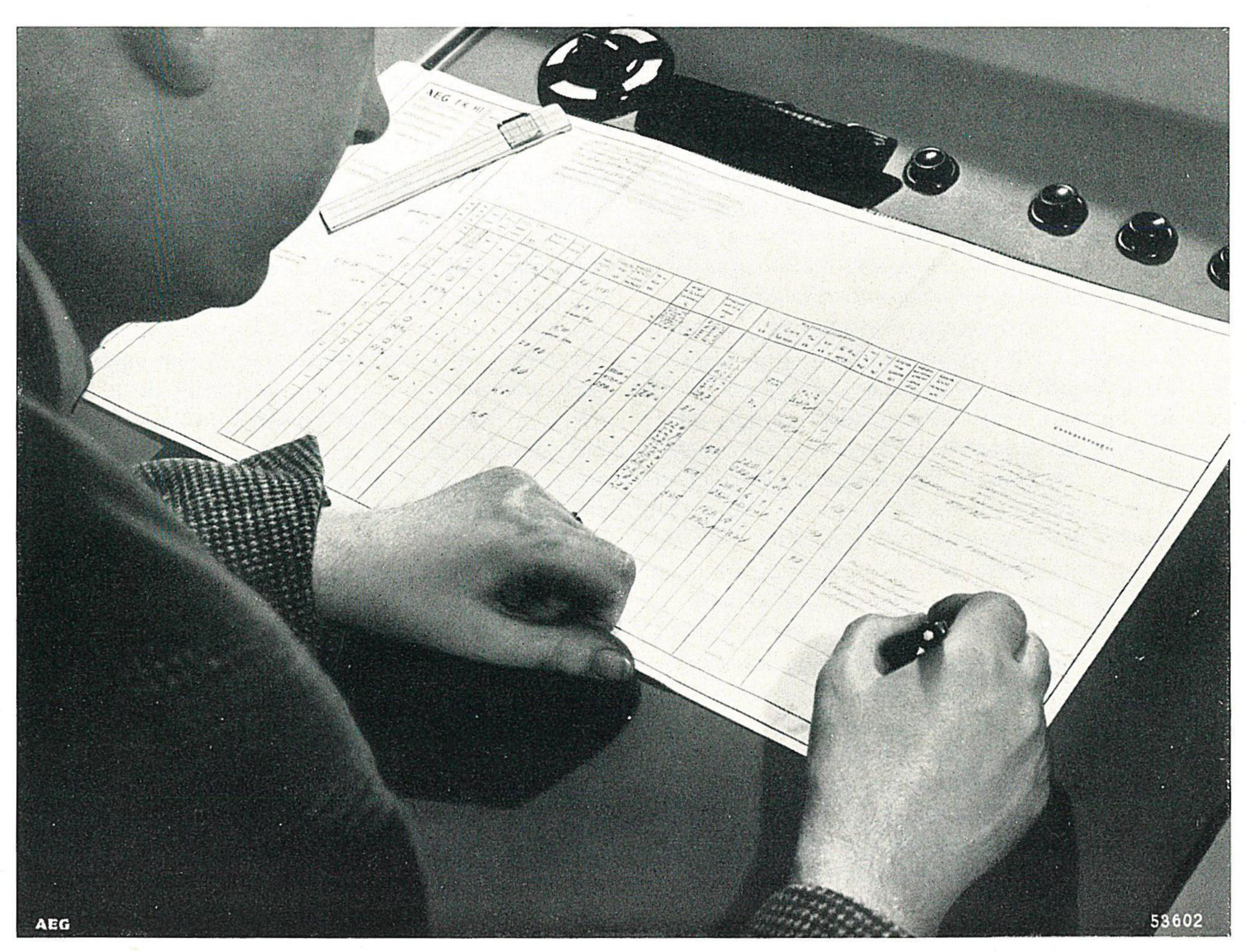
Instituts-Besprechung

großen Elektrofirmen, zu einer solchen intensiven Forschungs- und Entwicklungsarbeit gezwungen sind. Ein wichtiger Grund liegt darin, daß es bei der Herstellung von elektrotechnischen Geräten keine echten Fabrikationsgeheimnisse gibt. Es ist eine große Arbeit, einen neuen und besseren Leistungsschalter zu entwickeln und zu konstruieren. Sobald er einmal fertig ist, kann ihn jedermann nachbauen, wenn er nur ein Muster davon vorliegen hat. Alle die mühsam bei der Entwicklung erworbenen Kenntnisse liegen bei der fertigen Konstruktion offen zutage. Nicht immer reicht der Patentschutz hin, um einen solchen Nachbau zu verhindern. Wir sehen daher, daß die von den Großfirmen durch mühsame Forschung erarbeiteten Entwicklungen oft schon nach wenigen Jahren von kleineren Firmen mehr oder weniger genau nachgebaut werden, ohne daß diese auch nur einen geringen Anteil zur wirklichen Weiterentwicklung geleistet haben. Es darf nicht vergessen werden, daß die Entwicklung ganz überwiegend von den großen Firmen getragen wurde und daß die kleineren Firmen die Nutznießer dieser Arbeit sind, ohne die sie gar nicht existieren könnten.

Untersuchungen so grundlegender Art lassen sich nicht in einem Prüffeld durchführen. Der Weg, diese zusätzlichen Arbeiten dem Prüffeld zu übertragen, ist immer wieder versucht worden, er hat aber doch nie zu dem gewünschten Erfolg geführt. Ein Prüffeld arbeitet unter ganz anderen Voraussetzungen als ein Forschungsinstitut. Ein Prüffeld hat festzustellen, ob die hergestellten Geräte den durch die Vorschriften oder Lieferverträge festgelegten Bedingungen entsprechen. Dabei liegen genaue Prüfanweisungen vor, und die weitere Sorge des Prüffeldes muß sein, die baldige Lieferung des Gerätes zu ermöglichen. Erfahrungsgemäß gehen alle Ansätze zu einer wirklichen Forschungsarbeit in einem Prüffeld in kurzer Zeit unter dem Druck der Lieferverpflichtung in der eigentlichen Prüfarbeit unter, wenn nicht rechtzeitig für eine vollständige Abtrennung der Forschungstätigkeit von der Prüftätigkeit gesorgt wird. Das heißt aber nichts anderes, als daß Forschungsergebnisse ohne ein eigenes Forschungsinstitut nicht erarbeitet werden können.

Eine enge Verbindung zwischen Forschungsinstitut und Prüffeld wird natürlich immer vorhanden sein; sie ist auch zweckmäßig und notwendig. Aus dem Prüffeld stammt oft die Erkenntnis, in welcher Richtung Forschungsarbeiten anzusetzen sind, und das Prüffeld entscheidet zuletzt bei seiner Kontrolle der Lieferungen, ob die seinerzeit im Forschungsinstitut erarbeiteten Unterlagen zu dem gewünschten Ziel bei der Produktion geführt haben. Andererseits wird das Forschungsinstitut oft dort einspringen, wo die Mittel und Möglichkeiten des Prüffeldes nicht mehr hinreichen. Gerade bei Leistungsschaltern ist es selbstverständlich, daß die Typenprüfungen von Schaltern im Forschungsinstitut durchgeführt werden, weil man

sich den notwendigen Aufwand nur an einer Stelle wird leisten können.
Der Unterschied zwischen Prüffeld und Forschungsinstitut zeigt sich ganz klar an der Aufgabenstellung für das Forschungsinstitut. Seine Aufgabe ist die Erforschung neuer Wege und die Auswahl des optimalen Weges. Dabei sind alle Mittel zulässig, von der Theorie über den Laboratoriumsversuch zum Großversuch, zur Versuchsreihe in der Praxis und zum Netzversuch in den großen Anlagen der Verbraucher. Vom Forschungsinstitut verlangt man auch den Überblick über das Gesamtgebiet zur richtigen Einordnung des zu entwickelnden Gerätes in den Aufgabenkreis des Benutzers und schließlich die Erkenntnis der Entwicklungslinien und -aussichten für die Zukunft. Während sich ein Prüffeld sozusagen mit der Gegenwart beschäftigt, hat das Forschungsinstitut den Blick in die Zukunft zu richten, allerdings ohne dabei den Anschluß an die Gegenwart zu verlieren.
Alle diese Gesichtspunkte wurden auch bei der Errichtung des neuen Hochspannungsinstitutes der AEG in Kassel beachtet. Da dieses Institut sich mit allen Fragen der Hochspannungstechnik, aber ganz besonders mit der Entwicklung der Leistungsschalter zu befassen hat, so war es selbstverständlich, daß es auf dem Gelände der Hochspannungsschalterfabrik errichtet wurde. Die Zeit seit dem Beginn der Arbeiten in dem Hochspannungsinstitut hat auch gezeigt, daß die enge Verbindung mit der Hochspannungsschalterfabrik eine absolute Notwendigkeit ist. Andererseits hat es sich als zweckmäßig erwiesen, das Institut organisatorisch von der Fabrik weitgehend zu trennen, um die Unabhängigkeit der Arbeiten und Beurteilungen durch das Institut zu sichern.
Der materielle Aufbau des Institutes und seine Einrichtungen sind in anderen Abschnitten dieses Buches geschildert. Der organisatorische Aufbau folgt in großen Zügen der Teilung des Institutes in das Hochspannungs-Versuchsfeld und das Hochleistungs-Versuchsfeld. Dabei sind aber alle Aufgaben des Betriebes, wie Energieversorgung, Hausverwaltung usw., in einer Hand vereinigt. Andererseits besteht eine Gruppe, welche sich besonders mit der Entwicklung der Leistungsschalter befaßt und dabei auch die einschlägigen Arbeiten im Hochspannungs-Versuchsfeld mit betreut. Da hier vielfach sich überschneidende Aufgaben und Interessen auftreten, so ist es letzten Endes Aufgabe der Direktion des Institutes, für die richtige Koordinierung aller dieser Arbeiten zu sorgen.
Daß die Einrichtungen eines solchen Institutes universell und zweckmäßig sein müssen, bedarf keiner besonderen Erwähnung. Ebenso selbstverständlich ist, daß die Einrichtungen laufend verbessert werden



Prüfprotokoll

müssen, um den immer wachsenden Anforderungen jederzeit gerecht werden zu können. Von mindestens ebenso entscheidender Bedeutung ist die richtige Auswahl der Mitarbeiter. Die Zusammensetzung des Ingenieurstabes muß so getroffen sein, daß jedes anfallende Problem bearbeitet werden kann. Dabei kommt es bei den Mitarbeitern vor allem auf die Fähigkeit an, sich in ein neues Problem schnell einarbeiten zu können. Man muß daher von ihnen eine ganz besonders tiefgehende Kenntnis der Grundlagen der verschiedenen Gebiete der Physik und Technik verlangen. Neben diesen theoretischen Fähigkeiten müssen sie auch über ingenieurmäßiges Denken verfügen, um bei ihren Forschungen Rücksicht auf eine wirtschaftliche Realisierbarkeit nehmen zu können. Nicht zu vergessen ist ein gewisses Maß an Phantasie; denn viele neue Entwicklungen stammen nicht aus einer streng logischen Durchdringung, sondern sie sind die Frucht einer phantasievollen Eingebung. Aber auch diese wird gewöhnlich nur dem mit allen bisherigen Erkenntnissen vertrauten Fachmann zuteil.

ZIELE UND GRENZEN DER THEORIE

Otto Mayr

DK 001.1 : 001.5

Ziel der Theorie ist die Zurückführung der vielen bunten Erscheinungsformen der Natur auf die letzte Einfachheit einiger weniger, aber weitreichender Naturgesetze. Je besser dies gelingt, um so mehr hat auch der Praktiker seine Freude an der Theorie. Vor die Synthese der vielen Erfahrungstatsachen zum leitenden Sinn des Geschehens ist jedoch die Analyse gesetzt: ein jegliches Ding nach seiner Natur zu zerlegen und zu deuten, wie es sich verhält. Diese Zerlegung geht in der theoretischen Elektrotechnik bis zum Differential der Leitungslänge oder bis zur Elektronenhülle der Atome im Schaltlichtbogen. Dadurch wird auch der kürzeste Weg zum Ziel häufig ein weiter Weg, der die Geduld des Theoretikers ebenso wie die des Praktikers auf eine harte Probe stellt, und deshalb zeichnen sich die Grenzen der Theorie nicht allein dort ab, wo das Wissen überhaupt zu Ende ist, sondern auch dort, wo Aufwand und Ergebnis in einem schlechten Verhältnis zueinander stehen.

Das Wesen der Theorie und ihre Beziehung zur Praxis der Hochspannungstechnik zeigt sich besonders deutlich an dem Beispiel der Überspannungsfrage. Während die Berechnung der stationären Vorgänge in Maschinen und Leitungen bereits recht handwerksmäßig im Gange war, herrschte bezüglich der Ausgleichsvorgänge bis ins Jahr 1908 vollkommenes Dunkel. So spotteten damals die Überspannungen und ihre unangenehmen Folgen jeder Überlegung und jeder Rechnung. Zu einer Zeit, in welcher guter Rat so teuer war wie nie, überraschte K. W. Wagner — als 25jähriger Anfänger — die Fachwelt im Jahre 1908 mit seiner Theorie der Wanderwellen. Wohl hielt die Schwachstromtechnik in der viel älteren Theorie der Seekabel — auch Morsezeichen sind Wanderwellen — längst alles bereit, was notwendig war, um Wanderwellen in Starkstromleitungen verstehen zu können. Doch die Starkstromspezialisten waren damals so ausschließlich bei sich selbst zu Hause, daß fürs erste ein unbefangener Anfänger kommen und den Weg frei machen mußte.

Wir übersehen heute, daß die Theorie damals mit der Arbeit von K. W. Wagner nicht nur aufgeholt hatte, sie war der Praxis vielmehr um 20 Jahre vorausgeeilt; denn es dauerte bis ums Jahr 1928, bis es die Praxis nach vielen Irrwegen verstanden hat, den Wanderwellen mit brauchbaren Überspannungsableitern wirksam zu begegnen. Die Schuld daran lag in der Rückständigkeit der Meßtechnik, denn bis zu den Wanderwellenversuchen von Binder und bis zur Verbesserung der Braunschen Röhre durch Rogowski waren die Wanderwellen eine abstrakte, papierne Angelegenheit geblieben.

Wie sehr die Praxis auf solche Meßeinrichtungen gewartet hatte, kann daran ermessen werden, daß sich das Hochspannungslaboratorium der AEG bei Rogowski sofort einen solchen Kathodenstrahl-Oszillographen bestellte. Mit diesem zweiten vom Hochspannungs-Institut der Technischen Hochschule Aachen Anfang 1928 fertiggestellten Oszillographen wurden, nachdem umständliche Funkenstreckenmessungen vorausgegangen waren, die ersten Kennlinien der Ableiter mit spannungsabhängigen Widerständen (SAW) und die ersten Wanderwellenbilder an Transformatorenwicklungen aufgenommen. Diese Messungen führten zu der bekannten und bewährten Kombination der SAW-Widerstände und der Löschfunkenstrecke [1]). Sie gaben weiterhin Anlaß zur Entwicklung der mit reinem Papier und Öl isolierten Lagenwicklung von Transformatoren durch J. Biermanns. Die Theorie, die sich zuvor weidlich gequält hatte, die Wanderwellen in den Wicklungen mit ihren vielseitigen induktiven und kapazitiven Kopplungen zu berechnen, war jedoch damit nicht überflüssig, sie war vielmehr zur Deutung dieser Messungen ein unentbehrlicher treuer Begleiter geworden. So ergab sich bei der aus Überspannungsfragen entstandenen Lagenwicklung sofort auch die Frage der Kurzschlußfestigkeit. Hier konnte W. Krämer die zunächst nur beobachtete, überraschend große Verbesserung alsbald auch theoretisch begründen und die für die Berechnung von Großtransformatoren notwendigen Unterlagen schaffen.

Obwohl K. W. Wagner sich mehr und mehr der Nachrichtentechnik zugewandt hatte, nahm er als Berater der AEG-Entwicklungsstätten in diesen Jahren

lebhaften Anteil an den nunmehr durch ausreichende Messungen ergänzten Forschungen auf allen Gebieten des Überspannungsschutzes.
Eine ähnliche Entwicklung hat sich bei der Erforschung des elektrischen Durchbruches von Gasen vollzogen. Auch hier haben der Elektronenstrahl-Oszillograph und die Wilson'sche Nebelkammer die Elektronenlawinen nach jahrelangem rein theoretischem Vermuten zu einer sichtbaren Realität erhoben.
So zeigt es sich immer wieder, daß auch die Mittel und Wege, die der Theorie zur Verfügung stehen, einer raschen Entwicklung unterworfen sind. Deshalb ist es nicht allein notwendig, einzelne Spezialgebiete nach allen nur möglichen Ursachen und Wirkungen hin in gründlicher Arbeit zu erforschen, sondern gleichzeitig scheinbar fernliegende Entdeckungen und Erfindungen, wie z. B. die Ionisation durch die kosmische Strahlung oder die Nebelkammer aus der Atomphysik, in die technische Forschung einzubeziehen. Wie reich die Starkstromtechnik durch solche Entwicklungen beschenkt wird, zeigt sich am Lichtbogen, dessen Stromleitung erst 100 Jahre nach seiner Entdeckung durch die aus der Astrophysik stammende Saha'sche Formel der Thermoionisierung verständlich wurde, oder an den Widerständen der Ableiter, deren Spannungsabhängigkeit nach 25 Jahren praktischer Anwendung durch die neueste Entwicklung des Transistors und die hierfür entwickelte Theorie der Halbleiter und ihrer Defektelektronen einer physikalischen Erklärung entgegengeht.
Die Theorie konnte sich lange Jahre auf elektrische und magnetische Felder beschränken. Nach der Erforschung der Ausgleichsvorgänge in Maschinen und auf Leitungen und der elektromagnetischen Kräfte bei Kurzschlüssen stellte der Selektivschutz die Frage nach der örtlichen Verteilung des Erdschlußstromes, insbesondere bei Doppelerdschluß. Entscheidende Fragen des Distanzschutzes konnten erst gelöst werden, nachdem man sich auf theoretischem Wege ein Bild vom Skin-Effekt des Wechselstromes im Erdboden gemacht hatte und nachdem auch die Induktivität der Erd-Rückleitung der Rechnung zugänglich geworden war [2]).

Überblickt man die Gegenwartsfragen der Hochspannungstechnik, so findet man, daß sich die theoretische Forschung vor allem auf die Gasentladungen, d. h. auf den elektrischen Durchbruch der Gase, die Kurzschluß- und Schaltlichtbogen und die Korona-Entladung, verlagert hat. Gegenüber den Systemen mit linearer Charakteristik, wie elektrische und magnetische Felder, Leitungen und Netze, treten hierfür wie in der Thermodynamik fast durchweg statistische und folglich nichtlineare Wahrscheinlichkeitsgesetze auf. An die Stelle einiger weniger spezifischer Widerstände sowie dielektrischer und magnetischer Konstanten tritt eine Unzahl von Materialeigenschaften und variablen Größen, wie Schmelz- und Verdampfungs-Temperatur und -Wärme der Elektroden, Elektronenaustrittsarbeit, Druck, Geschwindigkeit, Temperatur, Dissoziationsgrad, Wärmeleitung, Wärmestrahlung, Ionisierungsspannung des leitenden Gases, ferner die Massen und die Beweglichkeiten des Elektrons, der dem Zerfall unterworfenen Gasmoleküle und der Metalldämpfe. Täglich stellt hier der Versuch überraschend neue Fragen an die Theorie und die Theorie neue Fragen an den Versuch. Nur langsam zeichnen sich in dem Mosaik dieser vielen sich überlagernden Vorgänge große Linien ab.
Die praktische Auswirkung dieser Erkenntnisse zeigt sich vor allem im Hochleistungsschalter. Hier begegnen sich im Kurzschlußkreis mit seinen Induktivitäten und Kapazitäten, mit dem Kurzschlußstrom und der wiederkehrenden Spannung und im Schaltlichtbogen die alte, auf die Maxwellschen Gesetze aufgebaute Theorie und die Physik der Gasentladungen. Noch in den zwanziger Jahren war z. B. im Handbuch der Physik von Geiger-Scheel über den Wechselstromlichtbogen nur wenig zu finden, und dieses wenige beschränkte sich auf den Niederspannungs-Lichtbogen zwischen Kohlenelektroden. So ist es kein Wunder, daß sich die Hochspannungstechnik wichtige Erkenntnisse über die Kühlung des Schaltlichtbogens, den Einfluß des Elektrodenmaterials und des Löschgases, die Stabilität des Wechselstrombogens und seine Entionisierung nach der Strom-

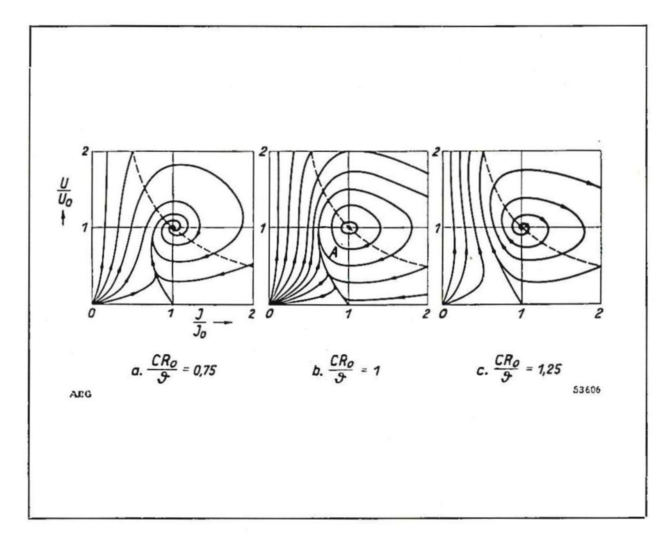


Bild 1. Ausgleichsvorgänge in Gleichstrom-Lichtbogen mit Parallelkapazität (berechnet)

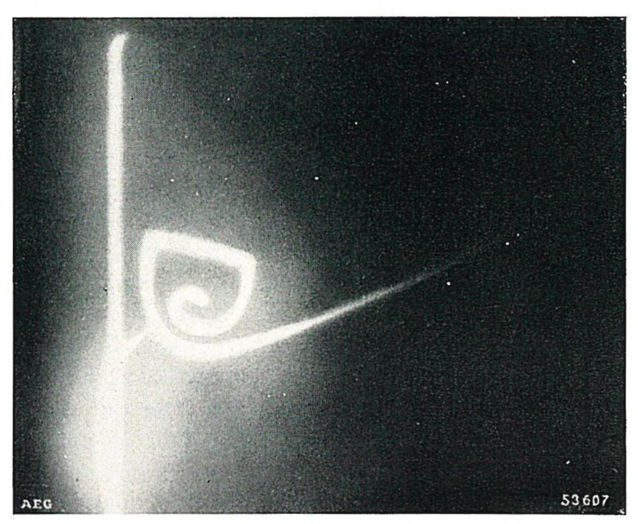


Bild 2. Zündung einer Entladung in Neongas (Oszillogramm)

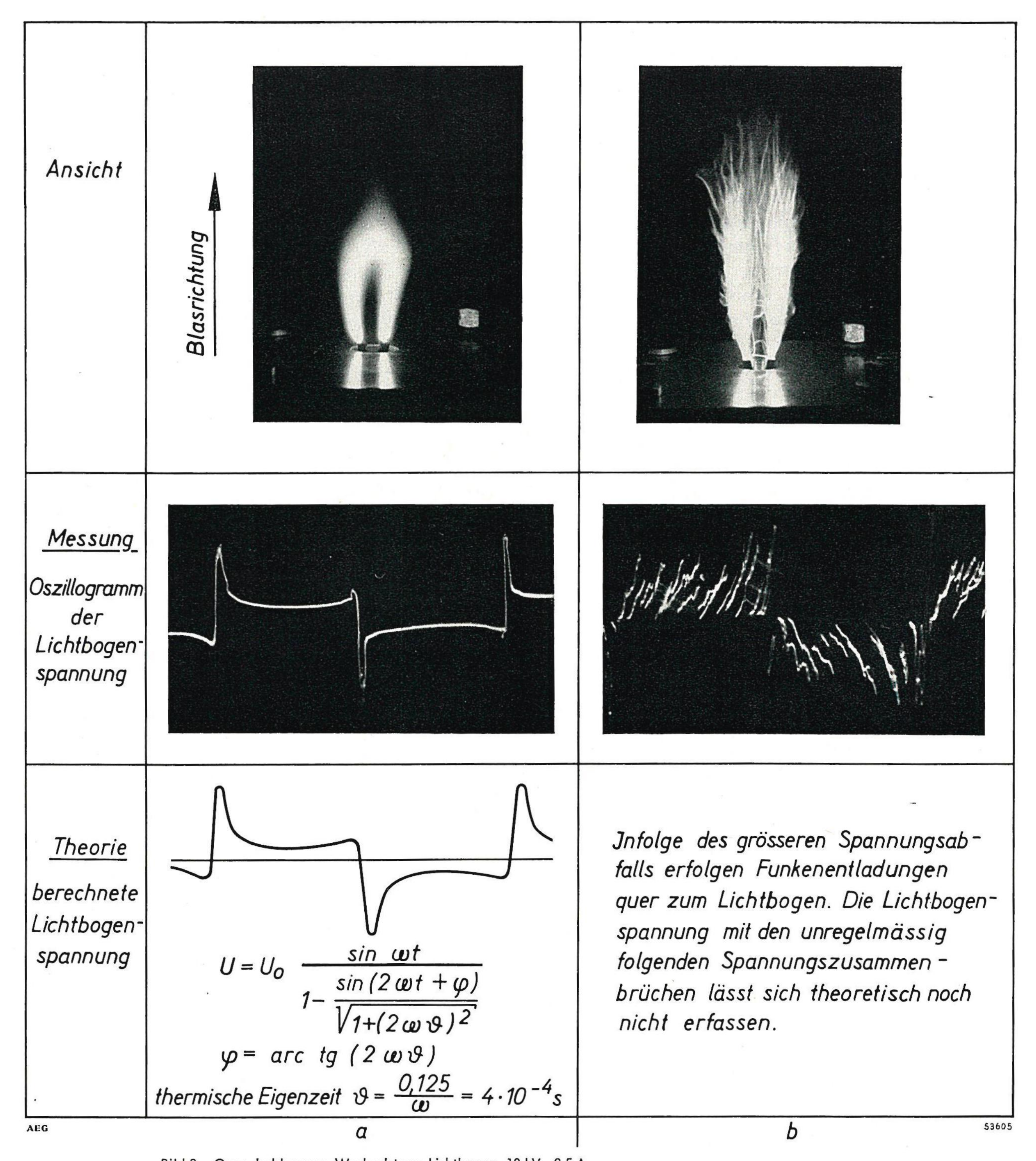


Bild 3. Quer beblasener Wechselstrom-Lichtbogen 10 kV, 2,5 A
a) Luftgeschwindigkeit 10 m/s b) Luftgeschwindigkeit 100 m/s

unterbrechung selbst erarbeiten mußte. Die gegenüber anderen Hypothesen heiß umstrittene Theorie der Kühlung des Schaltlichtbogens durch die Wärmeleitung und die Konvektion des Löschgases wurde 1932 durch Versuche mit verschiedenen Gasen erstmals befestigt. Inzwischen hat sich diese Theorie soweit verfeinert, daß viele Eigenschaften des Schaltlichtbogens durch die Theorie erklärt werden können [3]). Die Bilder 1 bis 3 zeigen Beispiele, was diese Theorie heute leisten kann und wo sich heute noch Grenzen zeigen. Als besonders fruchtbar hat sich dabei die Einführung und Begründung der thermischen Eigenzeit ϑ des Lichtbogens erwiesen. Sie verbindet die thermische Trägheit der Bogensäule mit der durch die Wärmeleitung abgeführten Energie und dadurch mit dem elektrischen Stromkreis. Damit ist insbesondere der Schlüssel gegeben, um den Zusammenhang zwischen der Schaltleistung und der Frequenz der wiederkehrenden Spannung sowie die Frage des Nachstromes nach dem letzten Nulldurchgang des Kurzschlußstromes auch theoretisch zu erfassen und zu untermauern.

In vielen Fällen läßt sich bereits klar übersehen, wieweit der Kurzschlußkreis dem Schaltlichtbogen seinen Zwang aufdrückt und wieweit der Lichtbogen wiederum ins Netz zurückwirkt. Diese Rückwirkung bei großen und bei kleinen Strömen im guten Sinne weiter zu stärken und mit vollem Bewußtsein zu steuern, ist die eigentliche und daher wichtigste Aufgabe jeder Schalterentwicklung.

Auch mit der Korona-Entladung, insbesondere mit der Korona der 400 kV-Leitungen, ist ein Gasentladungsproblem in den Vordergrund getreten. Es geht hier um die Frage, wieviel Güterzüge Kohle sich jährlich einsparen lassen, wenn es gelingt, die Korona-Verluste der 400 kV-Netze gering zu halten. Noch mehr als beim Lichtbogen sind hier die Bewegungen der Ladungsträger im elektrischen Feld zwischen den Leitungsseilen der direkten Beobachtung entzogen. Andererseits sind die Temperaturen niedrig, und damit waren für die Theorie die günstigen Voraussetzungen gegeben, um die physikalischen Zusammenhänge befriedigend darzustellen und sowohl der Messung wichtige Anhaltspunkte zu geben als auch den Meßergebnissen an besonders errichteten Versuchsleitungen durch ihre Übertragbarkeit auf beliebige Mastbilder einen allgemeinen Wert zu verleihen. Wenngleich es zwar auch hier noch nicht gelungen ist, die Korona-Verluste ohne jeden Versuch exakt zu berechnen, so konnte doch die rein empirisch entstandene Peek'sche Formel durch eine theoretisch begründete Formel[4]) ersetzt werden. Sie stimmt mit der Messung erheblich besser überein; außerdem enthält sie neben der Frequenz noch den Leiterradius als Parameter und stellt damit den Anschluß auch an die Theorie der Bündelleiter her.

Sieht man von den vielen Fragen ab, welche die Theorie heute schon handwerksmäßig zu bearbeiten in der Lage ist, so bleibt neben den Gasentladungen und den schon erwähnten Halbleiterwiderständen noch das weite Feld der festen und flüssigen Isolierstoffe als das Gebiet übrig, das die Theorie noch am wenigsten erschlossen hat. Wohl sind der makroskopischen Theorie des Wärmedurchschlages einige Erfolge beschieden gewesen. Aber die Frage der elektrischen Stoßfestigkeit, die nur über die Molekulartheorie zu lösen ist, konnte selbst bei dem einfachen homogenen Steinsalzkristall noch nicht befriedigend gelöst werden. Schon hier, und natürlich noch viel mehr bei den organischen Isolierstoffen, sucht sich die elektrische Entladung Wege, an welche die Theorie bisher nicht herankam. So finden wir die Grenze unseres theoretischen Wissens teils weit hinausgestreckt, teils in gutem Vordringen, teils aber auch eng und starr gefügt.

Die Forschung und damit auch die Theorie führen bis zu einem gewissen Grade ein Leben für sich, ein Umstand, der vor allem subjektiv begründet ist. Schon bei der Berufswahl scheiden sich mehr naturwissenschaftlich veranlagte Naturen von mehr technisch-wirtschaftlich eingestellten. Die Forschung hat für die wissenschaftlich Veranlagten dadurch besonderen Wert, daß die Entdeckung neuer Naturgesetze ihr Ethos in sich trägt, daß diese Gesetze durch ihre universelle Geltung auch engste Spezialgebiete häufig weit über die Grenzen der Technik hinaus verbinden und daß schließlich die physikalischen Grundlagen ihre Geltung behalten, wenn auch die technischen Ausführungsformen ihr konstruktives Aussehen noch so sehr verändern. Der Trennung von Theorie und Praxis entgegen wirken dagegen jene glücklichen Begabungen, die technisch-physikalisch und technisch-wirtschaftlich gleich aufgeschlossen sind.

In der technischen Forschung erfordert meist schon der Beginn einer Arbeit starke praktische Fähigkeiten, um aus einem technischen Problem eine Frage an die Theorie oder an den Versuch so herauszuformen, daß auch die Möglichkeit einer Lösung oder einer Antwort besteht. Bisweilen hängt alles davon ab, einen stark idealisierten Kern geschickt herauszuschälen, der eine erste Näherungslösung in sich trägt und der sich nach der ersten Erprobung schrittweise erweitern läßt. Auch die Wahl der Mittel setzt sowohl technischen als auch wirtschaftlichen Weitblick voraus. So wie durch manche Überlegung oder Rechnung ein teurer Versuch gespart oder wenigstens dessen Erfolg gesichert werden kann, ebenso kann auch ein Versuch oder eine einfach gebaute Rechenmaschine, etwa in Form eines Netzmodells oder eines elektrolytischen Troges, den Aufwand zur Lösung einer verwickelten Rechenaufgabe erheblich vermindern.

Wie die Theorie Fragen und Anregungen aus der Praxis nicht entbehren kann, so wird stets diejenige theoretische Lösung die beste sein, die der Praxis gleichzeitig mit der Lösung der gestellten Aufgabe neue Fragen und Anregungen vorlegt. Mit diesem letzten Ziel hilft die Theorie der technischen Praxis nicht allein, den Weg des blinden Probierens mit dem behaglicheren Weg des bewußten Handelns zu vertauschen, sondern auch die gänzlich neuen Wege zu finden, von denen sich unsere heutige Weisheit noch nichts träumen läßt.

Schrifttum

1) O. Mayr: Überspannungsableiter mit spannungsabhängigem Widerstand, AEG-Mitt. (1929) 3, S. 110—114, 10 B.

2) O. Mayr: Die Erde als Wechselstromleiter, ETZ 46 (1925) 36, S. 1352—1355 und 38, S. 1436—1440, 12 B, 3 T.
Einphasiger Erdschluß und Doppelerdschluß in vermaschten Leitungsnetzen, Arch. f. Elektrotechn. 17 (1926), S. 163.

3) O. Mayr: Hochleistungsschalter ohne Öl, ETZ 53 (1932) 4, S. 75—81 und 6, S. 121—123, 9 B, 4 T.
Die Resultate neuerer Forschungen über den Abschaltvorgang im Wechselstromlichtbogen und ihre Anwendung im Schalterbau (Ölschalter, Druckluftschalter, Expansionsschalter), Bull. SEV 23 (1932) 23, S. 605—609, 5 B.
Hochleistungsschalter ohne Öl, ETZ 55 (1934) 31, S. 757—760, 32, S. 791—794 und 34, S. 837—840 41 B.
Über die Theorie des Lichtbogens und seiner Löschung, ETZ 64 (1943) 49/50, S. 645—652, 16 B.
Beiträge zur Theorie des statischen und dynamischen Lichtbogens, Arch. f. Elektrotechn. 37 (1943) 12, S. 588—608, 20 B.

4) O. Mayr: Beitrag zur Theorie der Wechselspannungs-Korona, Jahrb. d. AEG-Forsch. 9 (1942), S. 164—176, 10 B.

HOCHLEISTUNGSVERSUCHE

Franz Petermichl

DK 621.317.1.026.44

Nach der stürmischen Entwicklung der Hochspannungstechnik in den vergangenen Jahrzehnten, die anfangs oft noch mit recht primitiven Methoden betrieben werden mußte, sind heute weitere Fortschritte nur durch eine hochentwickelte Versuchstechnik und wissenschaftliche Durcharbeitung der Probleme zu erzielen. Die Entwicklungsstätten der Industrieunternehmen sind darum schon seit längerer Zeit gezwungen, in weitem Umfang Grundlagenforschung zu treiben. Dadurch hat sich aber wiederum die Bedeutung der Versuche erweitert, die über das Probieren hinaus zu einem Mittel geworden sind, systematisch neue Erkenntnisse über allgemeine, grundsätzliche Zusammenhänge zu gewinnen.

Selbstverständlich ist der Hauptzweck eines industriellen Hochspannungsinstitutes kein rein wissenschaftlicher, sondern ein praktischer; darum muß auch die Planung der Arbeiten in diesem Sinn ausgerichtet sein. In den meisten Fällen handelt es sich um konkrete Aufgaben, für die nicht unbegrenzte Zeit und Mittel zur Verfügung stehen. Deshalb steht auch die Wahl einer zweckmäßigen Versuchsmethode immer wieder im Vordergrund. Sie ist bei der Bearbeitung neuartiger Probleme oft nicht leicht und die Entscheidung selbstverständlich von Fall zu Fall verschieden.

Zwar kommt es oft vor, daß intuitiv der richtige Weg eingeschlagen und auch die Versuchsanordnung sofort richtig getroffen wird, allgemein kann man aber wohl sagen, daß ein streng systematisches Verfahren, auch wenn es zunächst umständlich aussieht, rascher zum Ziel führt als die Spekulation auf eine gerade sichtbare Chance. Es hat außerdem den Vorteil, allgemeineren Aufschluß zu geben und dadurch den Boden für die Weiterarbeit vorzubereiten.

Als Illustration sei ein Beispiel vom Beginn der Entwicklung des Druckgasschalters in unserem Berliner Hochleistungs-Versuchsfeld angeführt. Damals standen wir als Anfänger vor der recht simpel er-

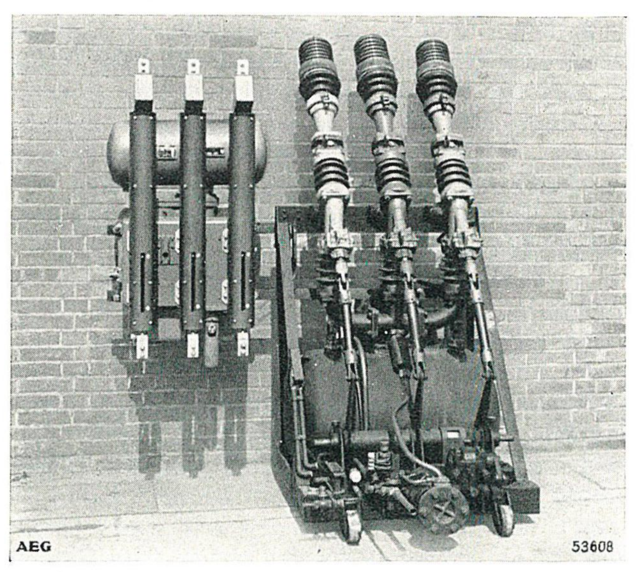


Bild 1. Erster Hochspannungs-Druckgasschalter aus dem Jahr 1929 für R 10 und 400 MVA neben einem Druckgas-Wandschalter heutiger Bauart für die gleiche Leistung

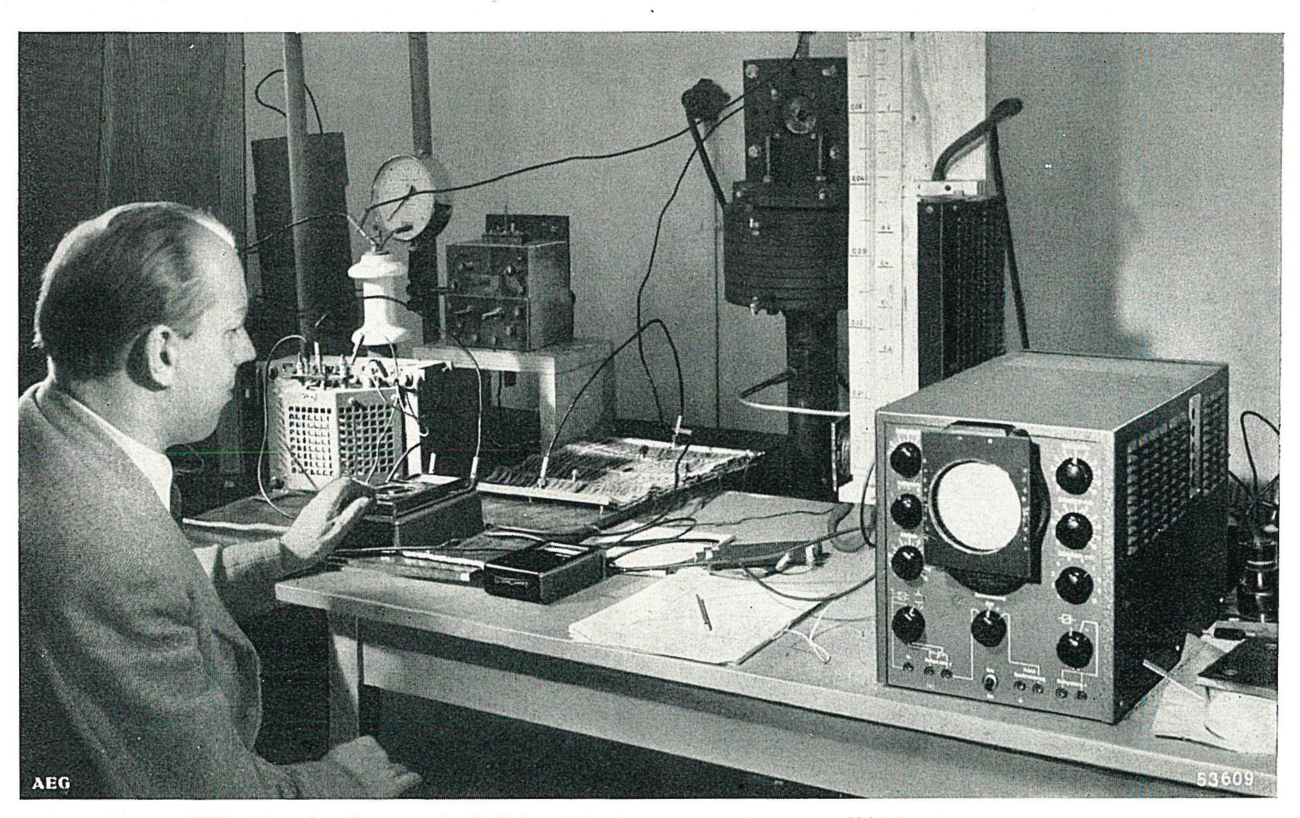


Bild 2. Versuchsaufbau zur physikalischen Erforschung von Hochspannungs-Lichtbögen

scheinenden Frage, wie wir die Flammen bändigen sollten, die beim Abschalten von Kurzschlüssen aus den Düsen der Druckgasschalter geblasen wurden. Sie bestanden zwar nur wenige hundertstel Sekunden lang, hätten aber in der Schalterzelle Überschläge verursacht. Wir schlossen darum an die Düsen Rohre an, um die Flammen einzuschließen. Wie staunten wir aber, als die Rohre im Laufe der Versuche bereits auf 10 m verlängert waren und die Flammen am freien Ende immer noch ebenso lang zum Vorschein kamen, wie sie ohne das aufgesetzte Rohr aufgetreten waren.
Wir erkannten zunächst, daß es sich wirklich nur um Abgas handelte und nicht vielleicht um den Lichtbogen selbst. Der Lichtbogen ist nur wenige Zentimeter lang und bleibt bis zum Erlöschen zwischen den Elektroden. Die starke Luftströmung trägt glühendes Gas aus ihm heraus; diese glühenden Wolken bilden die Flammen, die im Moment, wo sie sichtbar werden, schon jeden räumlichen Zusammenhang mit dem Lichtbogen verloren haben, weil dieser bereits gelöscht ist. Um den glühenden Abgasen ihre Gefährlichkeit zu nehmen, ist es notwendig, sie zu kühlen. Dies läßt sich schon mit kurzen Kühlern erreichen, wenn man die Gase mit genügend großen Metallflächen in Berührung bringt. Die anfänglich verwendeten Kühler aus Raschigringen wurden später durch wirksamere Plattenkühler ersetzt.
Begibt man sich bei einer neuartigen Aufgabe auf unbekannten Boden, so wird es allerdings das beste sein, zunächst in irgendeiner naheliegenden Weise anzufangen, um überhaupt erst einmal mit den Dingen in Kontakt zu kommen. Es ergeben sich im Anfangsstadium ja doch meistens Überraschungen, welche die beste Versuchsplanung über den Haufen werfen können.
So geschah es z. B. auch 1927 bei Versuchen zur Entwicklung einer druckluftbeblasenen Löschfunkenstrecke für Überspannungsableiter. Schon die erste Versuchsanordnung, bei der bereits die heute vielfach gebräuchliche axiale Beblasung des Lichtbogens zur Anwendung kam, wies bei Kurzschlußabschaltversuchen ein Leistungsvermögen auf, in dem sich die

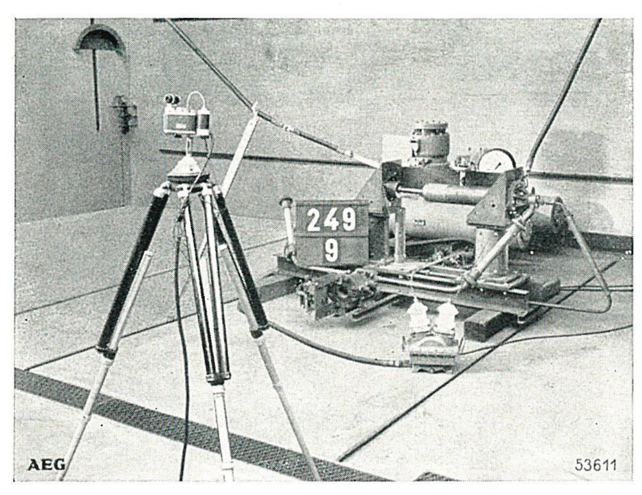


Bild 4. Versuchsschalter für grundsätzliche Untersuchungen der Einschaltfestigkeit von Kontakten in Luft in einem Versuchsstand des Hochleistungsversuchsfeldes.

Überlegenheit der Druckluft als Löschmittel sehr deutlich zeigte. Der Gedanke, nach diesem Prinzip einen Hochleistungsschalter zu bauen, lag also sehr nahe. Wir verzichteten auf die Weiterentwicklung eines druckluftbeblasenen Überspannungsableiters und begannen die Entwicklung des Druckgasschalters. Für den Überspannungsableiter fanden wir dann in den Vielfachfunkenstrecken eine viel einfachere Lösung.
Im Laufe längerer Entwicklungen gerät man gelegentlich in eine Sackgasse und es kommt zu einem Stillstand. Solche „eingeschlafenen" Versuche lassen sich durch radikalen Wechsel der Versuchsmethode, die einen Einblick auch von einer anderen Seite erlaubt, oft überraschend neu beleben. Sie weisen aber besonders dringlich auf die Notwendigkeit hin, mit systematischer Arbeit einzusetzen.
Die fortschreitende Spezialisierung der Wissensgebiete macht heute in vielen Fällen eine enge Zusammenarbeit von Spezialisten verschiedener Fachrichtungen notwendig. Größere Entwicklungen sind darum nicht selten ausgesprochene Gemeinschaftsarbeiten. Ein Beispiel dafür war die Entwicklung des Hartgasschalters, bei dem man ganz ungewöhnliche Forderungen an das Löschkammermaterial stellen mußte. Es sollte nämlich schon bei kurzzeitiger Einwirkung des Lichtbogens auf seine Oberfläche Gase mit guten Löscheigenschaften abgeben, ohne Kohlekriechwege oder leitende Rückstände zu bilden. Außerdem mußte es mechanisch fest, beständig, nicht hygroskopisch sein und eine hohe Isolierfestigkeit behalten. Es gab unter den bekannten Stoffen keine, welche diese Eigenschaften in ausreichenden Maßen vereinigten. Erst den jahrelangen gemeinsamen Anstrengungen von Elektrotechnikern, Chemikern, Physikern, Schalterkonstrukteuren und Fabrikationsspezialisten ist die Neuentwicklung einer Anzahl geeigneter Löschmaterialien gelungen. Eine solche Zusammenarbeit erfordert natürlich, daß sich die Beteiligten völlig in die Arbeitsgemeinschaft einfügen.
Vergegenwärtigt man sich die große Verschiedenartigkeit der Versuchsobjekte und der Versuchsbedingungen, so ist es nicht verwunderlich, wenn die gebräuchlichen Meßmethoden mitunter gänzlich versagen, zumal unter dem Einfluß von starken Feldern, hohen Temperaturen und Drücken. Besondere Schwierigkeiten entstehen manchmal, wenn Schaltlichtbögen auftreten, wenn die zu beobachtenden Vorgänge äußerst schnell ablaufen, die Meßstellen unter Hochspannung stehen oder sonstwie schwer zugänglich sind. Die Abwandlung bekannter Meßverfahren und das Ersinnen neuer Methoden ist darum für den Versuchsingenieur nichts Außergewöhnliches. So wird die Röhrentechnik in immer stärkerem Maße herangezogen, wenn es sich z. B. um verzögerungsfreie Impulsübertragung oder um die Aufnahme kurzzeitiger Vorgänge handelt.
Bei der Durcharbeitung technischer Probleme wird der „Probe" die letzte Entscheidung zuerkannt. Sie stellt im Grunde genommen eine Frage dar, die wir an die Natur richten, und wir verbinden mit deren Antwort die Vorstellung absoluter Objektivität. Ist es

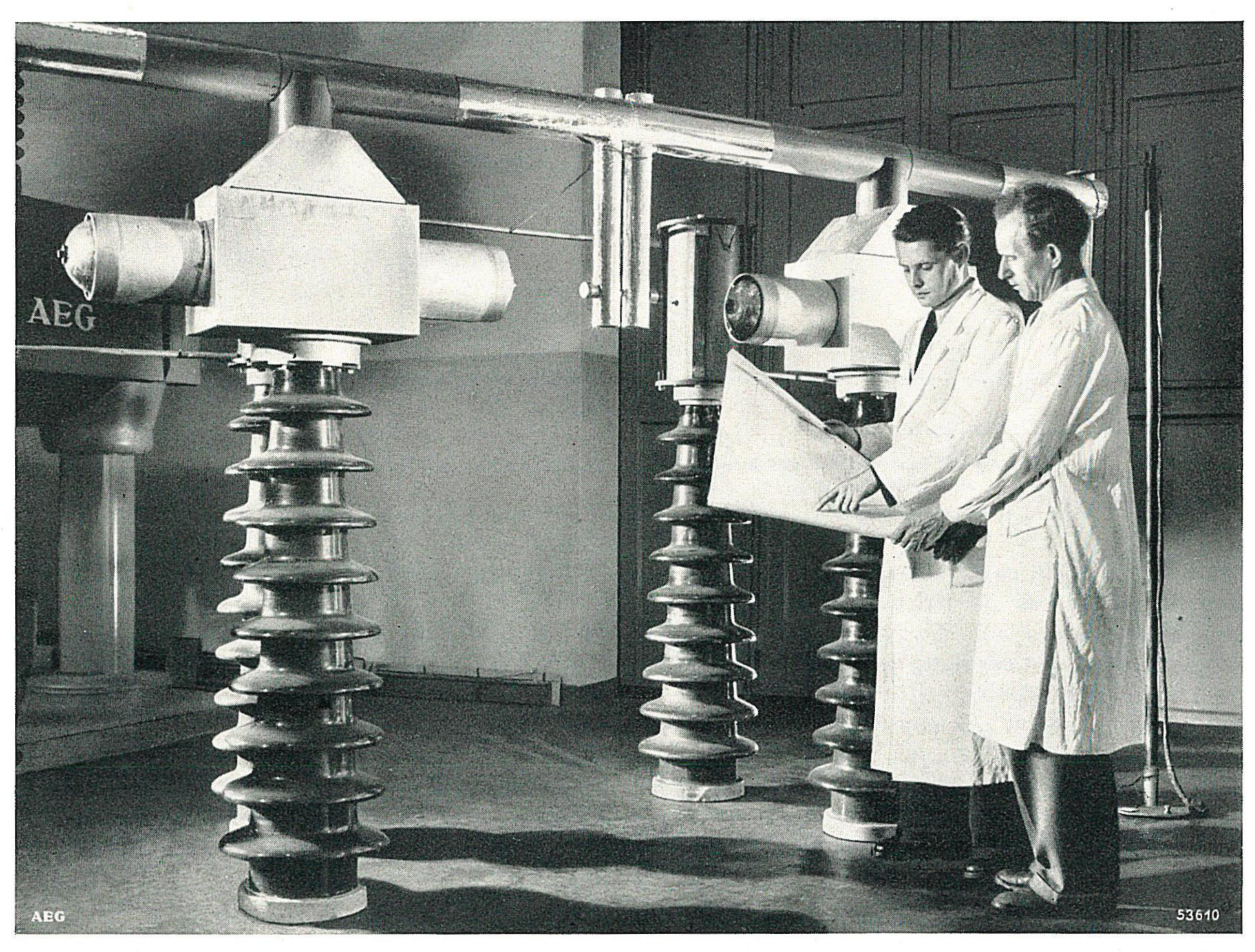
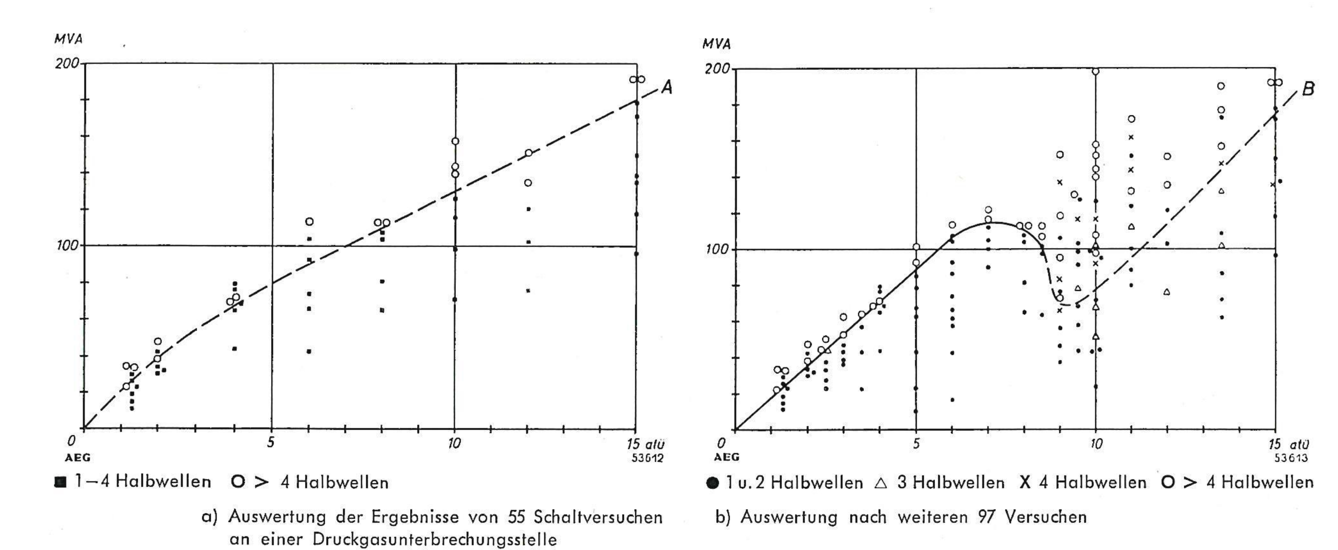


Bild 3. Improvisiertes Modell eines Hochspannungsschalters für orientierende Spannungsmessungen

aber schon nicht leicht, die Natur überhaupt zu einer grundsätzlichen Aussage zu bewegen, so ist es noch viel schwerer zu erkennen, ob sich die Antwort auch wirklich auf unsere Frage bezieht und ob wir sie auch richtig verstehen. Die Voraussetzungen dazu, nämlich eine eindeutige Fragestellung einerseits, also ein klarer Versuchsaufbau, der jeden ungewollten Einfluß ausschließt, und andererseits eine saubere Messung und eine exakte Beobachtung sind nicht immer vollkommen erfüllbar. Örtlich begrenzte Abnutzungen, Erwärmungen und Verunreinigungen, Wirbelbildungen in strömenden Medien, Lageveränderungen von Lichtbogen u. dgl. unkontrollierbare Einflüsse wirken mitunter auf den Versuchsablauf ein und können mit den unvermeidbaren Meßungenauigkeiten zusammen erhebliche Streuungen in die Ergebnisse bringen. Werden die Streuungen nicht als solche erkannt, oder werden umgekehrt tatsächlich abweichende Meßpunkte für Streuwerte gehalten, so entstehen Täuschungen, die um so eher möglich sind, je weniger Einzelergebnisse der Messung vorliegen. Nicht selten wird auch ein Wunsch oder eine bestimmte Erwartung in die Auswertung hineinspielen; es mag daher hin und wieder angebracht sein, Einzelergebnisse von jemandem auswerten zu lassen, der die näheren Zusammenhänge nicht kennt. Streuungen lassen sich zwar durch eine größere Zahl von Versuchen auf statistischem Wege eliminieren; eine eingehende Beschäftigung mit ihnen ist aber in vielen Fällen lohnend. Geht man nämlich den Ursachen dieser Streuungen nach, so gewinnt man manchmal einen Einblick in grundsätzliche Zusammenhänge, die in ihnen verborgen waren. Auch in dem folgenden Beispiel wurde erst nach sorgfältiger Auswertung der Versuchsergebnisse ein damals noch unbekannter Einfluß auf den Versuchsablauf sichtbar.

Bei der Entwicklung des Druckgasschalters war die Wirkung des Luftdruckes in den Düsen der Unterbrechungsstelle auf die Lichtbogenlöschung zu untersuchen. Sie interessierte sowohl für die konstruktive Auslegung der Schaltstrecke als auch hinsichtlich ihres direkten Einflusses auf die Ausschaltleistung. Als Versuchsobjekt diente eine Unterbrechungsstelle des Freistrahlschalters in verkleinerter Ausführung, die mit stark verschiedenem Luftdruck betrieben werden konnte. Bei den einzelnen Versuchsreihen mit jeweils konstantem Luftdruck wurde die Ausschaltleistung durch entsprechende Erregung des Generators der Versuchsanlage stufenweise bis zum Stehlichtbogen gesteigert. Das Ergebnis jeder Versuchsreihe ist also jener Wert der Ausschaltleistung, bei dem eine längere Lichtbogendauer oder ein Stehlichtbogen auftritt. Wertet man in der Figur a im Bild 5 alle Schaltungen mit einer Lichtbogendauer von mehr als 4 Halbwellen als Versager, so läßt sich die Grenze des Schaltvermögens der Versuchsunterbrechungs-



a) Auswertung der Ergebnisse von 55 Schaltversuchen an einer Druckgasunterbrechungsstelle

b) Auswertung nach weiteren 97 Versuchen

Bild 5. Ermittlung des Zusammenhanges zwischen Luftdruck und Ausschaltleistung bei Druckgasschaltern

stelle durch die Kurve A angeben. Angesichts der Streuungen, die man bei Lichtbogenversuchen häufig beobachtet, ist man nun leicht geneigt, auch hier die Abweichungen von der stetig verlaufenden Kurve als Streuwerte zu deuten und sich mit Rücksicht auf den großen Aufwand an Zeit und Kosten, die derartige Versuche mit sich bringen, mit dem Ergebnis zu begnügen. Die Arbeit wurde in diesem Fall aber fortgesetzt und es stellte sich dabei überraschenderweise heraus, daß die Grenzkurve tatsächlich ganz anders verläuft. Die klare Grenze zwischen gelungenen und mißlungenen Ausschaltungen löst sich oberhalb von 8 atü ziemlich unvermittelt in ein breites Streuband mit verschieden langen Lichtbogenzeiten auf, wie dies die Grenzkurve B zeigt. Dieses Auflösen ist nicht zufällig, denn die eindeutige physikalische Ursache liegt in der Streuung der Überschlagspannung im inhomogenen Feld bei Druckluft von mehr als 8 atü. Bei der Messung dieser Überschlagspannung zwischen Spitzen in ruhender Druckluft erhält man im gleichen Druckgebiet die der Kurve B entsprechende Einsattelung.

PLANUNG UND AUFBAU DES INSTITUTES

Günther Bohn

DK 061.6 : 725.4.011/.012

Der Aufbau des Hochspannungsinstitutes ist durch seinen Aufgabenbereich bestimmt worden. Nach dieser Aufgabenstellung soll das Institut der ganzen AEG auf allen Gebieten der Hochspannungstechnik Hilfestellung leisten; insbesondere soll es die Grundlagen erarbeiten, die es den Fabriken und den projektierenden Abteilungen ermöglichen, bei ihren Arbeiten stets den letzten Stand physikalischer Erkenntnisse zu berücksichtigen. Darüber hinaus wird das Institut den genannten Stellen immer dann zur Verfügung stehen, wenn sie Wert darauf legen, ihre Erzeugnisse im Entwurfsstadium oder im Stadium der Fertigstellung Prüfungen zu unterziehen, die über den Rahmen der Möglichkeiten normaler Prüffelder hinausgehen. Insbesondere sollen diese Stellen so weit wie irgend möglich auch von der Notwendigkeit entlastet werden, Versuche draußen in den Netzen durchzuführen; denn derartige Versuche sind immer sehr zeitraubend und sehr kostspielig und können selten gründlich genug vorgenommen werden, um aus ihnen allgemein gültige Ergebnisse zu gewinnen.

Aus der Aufgabenstellung ergab sich von vornherein eine Zweiteilung des Institutes in ein Hochleistungs-Versuchsfeld und in ein Hochspannungs-Versuchsfeld. Im Hochleistungs-Versuchsfeld können — vorausgesetzt, daß die erforderlichen Kurzschlußleistungen zur Verfügung stehen — die Kurzschlußwirkungen studiert werden, die uns Hochspannungstechnikern im rauhen Betrieb der großen Hochspannungsnetze so große Sorgen bereiten. Im Hochspannungs-Versuchsfeld werden Spannungs- und Überspannungserscheinungen studiert, die uns angesichts des ständigen Anwachsens der Übertragungsspannungen immer neue Schwierigkeiten bieten. Daneben waren noch kleinere Laboratoriumsräume mit Einrichtungen zur Bearbeitung mehr physikalischer Probleme vorzusehen. Sie schaffen zum Teil das Fundament, von dem aus erst mit erträglichem Aufwand an die Bearbeitung der großen Aufgaben herangegangen werden kann. Zum anderen ermöglichen sie die Bearbeitung von Fragen, die mit dem ständigen Auftauchen neuer Isolier- oder sonstiger Aufbaustoffe, mit Fragen des Netzschutzes, der Netzüberwachung oder der Netzstabilität zusammenhängen. Selbstverständlich war auch für ausreichende, zweckmäßig eingerichtete Büro-, Besprechungs- und Vortragsräume zu sorgen. Endlich waren noch Nebenräume, wie Werkstätten, Lager-, Abstell- und alle jene Räume vorzusehen, die dem Wohlbefinden der Institutsangehörigen dienen.

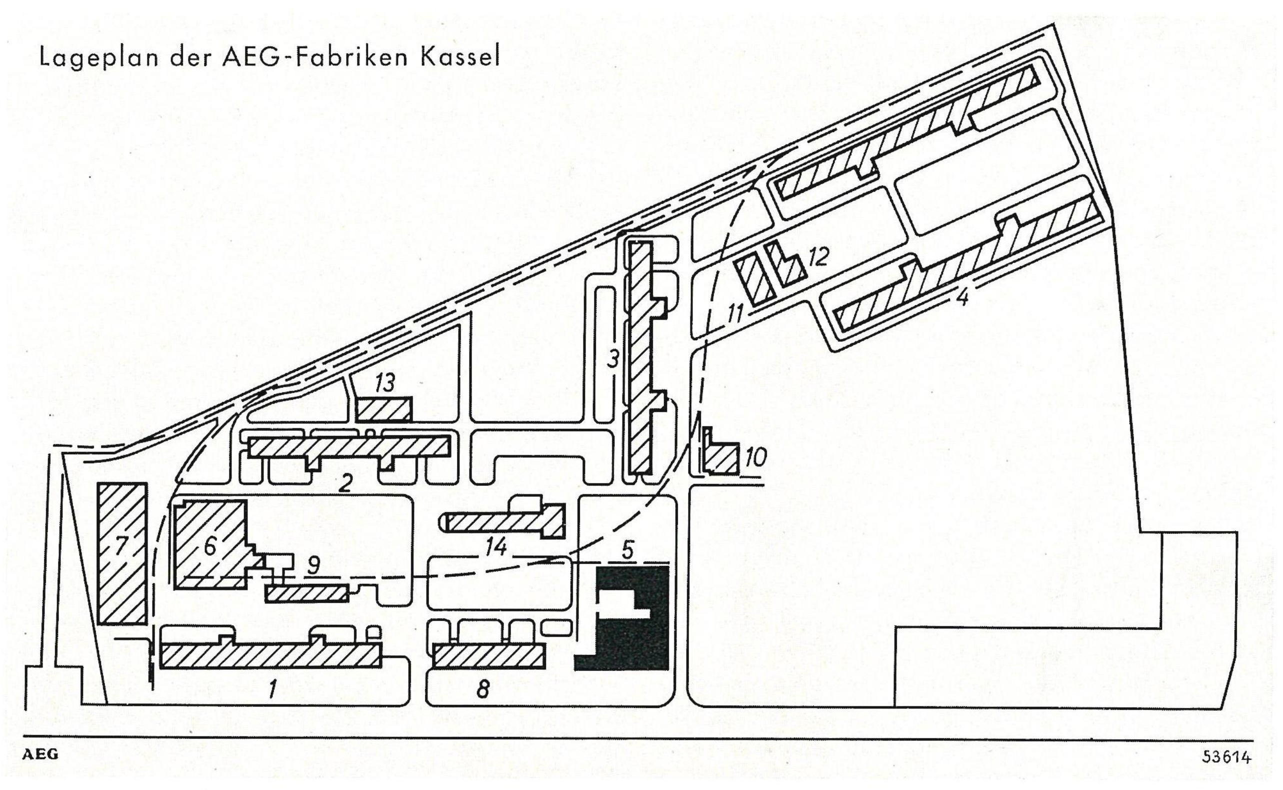


Bild 1.
1 Hochspannungsschalter-Fabrik
2 Werkzeugbau
3 Isolierstoff-Fabrik
4 Kühlschrank-Fabrik
5 Hochspannungs-Institut
6 Montagehalle
7 Rohlager
8 Blechbearbeitung
9 Versandlager
10 Heizwerk
11 und 12 Lackfabrik
13 Kitterei
14 Speisekantine und Garagen

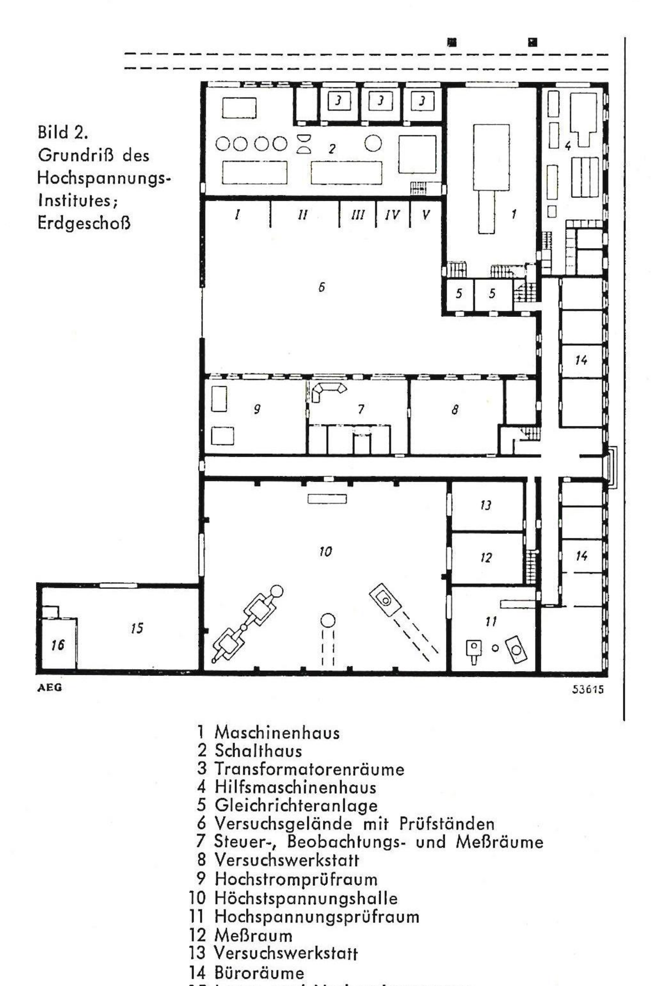


Bild 2.
Grundriß des Hochspannungs-Institutes;
Erdgeschoß

1 Maschinenhaus
2 Schalthaus
3 Transformatorenräume
4 Hilfsmaschinenhaus
5 Gleichrichteranlage
6 Versuchsgelände mit Prüfständen
7 Steuer-, Beobachtungs- und Meßräume
8 Versuchswerkstatt
9 Hochstromprüfraum
10 Höchstspannungshalle
11 Hochspannungsprüfraum
12 Meßraum
13 Versuchswerkstatt
14 Büroräume
15 Lager- und Vorbereitungsraum
16 Kälte- und Klimaraum

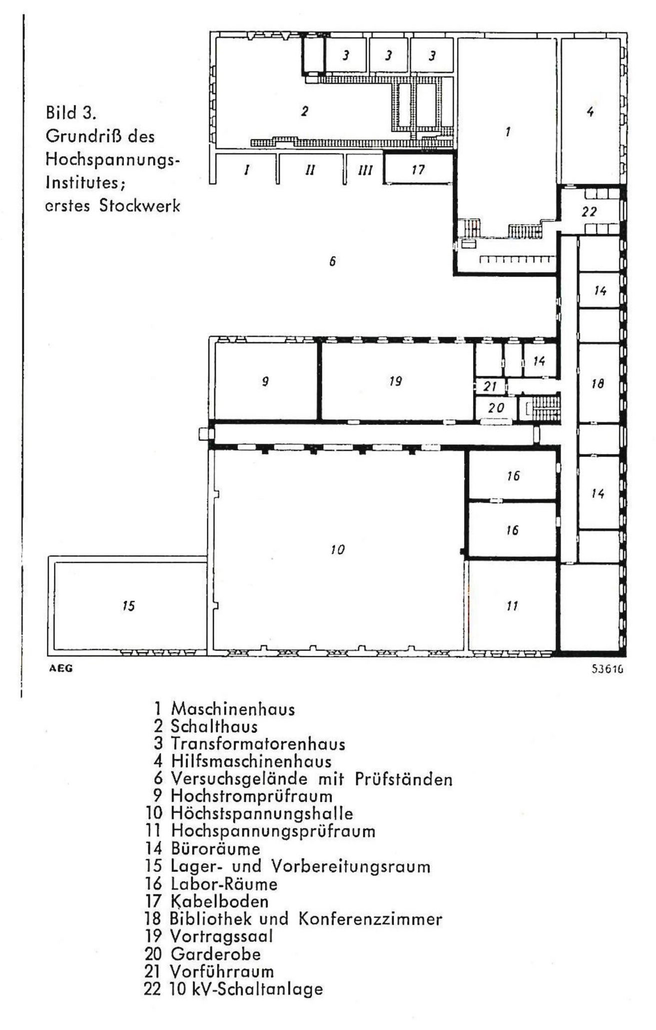


Bild 3.
Grundriß des Hochspannungs-Institutes;
erstes Stockwerk

1 Maschinenhaus
2 Schalthaus
3 Transformatorenhaus
4 Hilfsmaschinenhaus
6 Versuchsgelände mit Prüfständen
9 Hochstromprüfraum
10 Höchstspannungshalle
11 Hochspannungsprüfraum
14 Büroräume
15 Lager- und Vorbereitungsraum
16 Labor-Räume
17 Kabelboden
18 Bibliothek und Konferenzzimmer
19 Vortragssaal
20 Garderobe
21 Vorführraum
22 10 kV-Schaltanlage

Bild 1 zeigt einen Lageplan der AEG-Fabriken Kassel. Die Lage des Institutes im Kreise der eingezeichneten Fabriken ist symbolisch dafür, daß die Institutsarbeit nicht Selbstzweck sein kann, sondern sich dem Rahmen der übrigen Fabriken, ja der Gesamtfirma einzufügen hat. Bild 2 zeigt den Grundriß des Institutes, der die erwähnte Zweiteilung deutlich erkennen läßt. Ein Gang, der das ganze Gebäude in beiden Stockwerken durchzieht, trennt das Hochleistungs-Versuchsfeld vom Hochspannungs-Versuchsfeld. In diesem befinden sich auch die Laboratoriumsräume, die den mehr physikalischen Arbeiten dienen. Ein Grundriß des ersten Stockwerkes, in dem sich in der Hauptsache Büros, Besprechungszimmer und Vortragssaal sowie Photolabor und zwei Laborräume befinden, ist in Bild 3 dargestellt.

Die Transportfrage durfte bei der Planung nicht vernachlässigt werden. Deshalb liegen alle Räume, in denen in erster Linie für den Eisenbahntransport in Frage kommende Gegenstände aufgestellt sind, wie das Schalthaus, die Transformatorenzellen, der Maschinenraum und der Hilfsmaschinenraum, in einer Reihe längs des Anschlußgleises, wobei alle schwereren Maschinen in Waggonhöhe aufgestellt wurden. Der 25 t-Kran des Maschinenhauses, der gerade noch den Induktor der Maschine tragen kann, ist mit seiner Bahn über das Anschlußgleis hinausgeführt, so daß der Induktor, der keine behelfsmäßigen Umladungen verträgt, direkt vom Waggon abgehoben und in das Maschinenhaus eingefahren werden kann.

Das Schwergewicht des Hochleistungs-Versuchsfeldes liegt im Maschinenraum mit dem aus Kurzschlußgenerator und Antriebsmotor bestehenden Maschinensatz. Mit ihm wird die Kurzschlußleistung erzeugt, die im Versuchsfeld zu Entwicklungsversuchen und zur Prüfung von Hochspannungs-Leistungsschaltern gebraucht wird. Von ausschlaggebendem Einfluß auf die Errichtungs- und Betriebskosten des ganzen Institutes war die Festlegung der Kurzschlußleistung, die ihrerseits von den natürlichen Kurzschlußleistungen bestimmt wird, die in den großen Verteilungsnetzen irgendeines Landes auftreten können. Dieser Wert ist allerdings nicht leicht zu bestimmen, denn die größtmögliche Höhe der praktisch vorkommenden Kurzschlußleistungen ist keine konstante Größe, sondern steigt fortwährend schnell an.

Es wäre zweifellos der Idealzustand, wenn im Versuchsfeld eine Kurzschlußleistung zur Verfügung stünde, die der größten irgendwo auftretenden Kurzschlußleistung entspricht. Bei der Planung war daher zu der heute existierenden größten Kurzschlußleistung noch ein erheblicher Zuschlag zu machen. Das ergiebigste auf unserer Erde bestehende Netzsystem weist z. Z. eine größte Kurzschlußleistung von 8000 MVA auf. Es war also notwendig, in dem neu zu errichtenden Versuchsfeld eine Kurzschlußleistung von etwa 15 000 MVA bereitzustellen. Aber es ist kaum möglich, ein Hochleistungs-Versuchsfeld mit Maschinen dieser gewaltigen Kurzschlußleistung auszurüsten. Das Problem, wie eine so große Diskrepanz zwischen der geforderten und der tatsächlich erstellbaren Prüfleistung zu überbrücken sei, ist aber schon früher an uns herangetreten und nicht nur für das Schaltergebiet gelöst worden. Für die Schalterprüfung ist eine Anordnung von F. Weil, einem unserer im Kriege gefallenen Mitarbeiter, vorgeschlagen worden. Wir konnten außerdem auf den guten Erfahrungen weiterbauen, die mit einer solchen von G. Dobke[1]) unabhängig von F. Weil durchgebildeten Methode bei der Prüfung von Hochspannungsgleichrichtern großer Leistung gewonnen waren. Wir waren damit imstande, eine synthetische Schaltung zur Prüfung von Schaltern großer Leistungen aufzubauen. Diese von uns Weil-Schaltung genannte Anordnung bildet ein wesentliches Kernstück des Hochleistungs-Versuchsfeldes und ermöglicht es, Schalter mit mehr als der zehnfachen Kurzschlußleistung des Prüfgenerators unter Beanspruchungen zu prüfen, die dem wirklichen Netzbetrieb genau entsprechen.

Man konnte sich daher auf eine Kurzschlußleistung des Generators von etwa 1200 bis 1500 MVA mit Transformatoren bzw. 1600 bis 2000 MVA ohne Transformatoren beschränken. Beim Bau dieser Maschine durch die Turbinenfabrik der AEG wurden die oberen Werte erreicht, und diese Maschine ist daher der Generator mit der größten Kurzschlußleistung auf der Welt. Die Besonderheiten, die es ermöglichten, trotz kleiner Typenleistung dieses Ziel zu erreichen, sind in dem folgenden Beitrag ausführlicher behandelt.

Besondere Erwähnung verdient noch der Antriebsmotor, der als Gleichstrommotor für 1000 kW und 1000 Umdrehungen je Minute eine ausgesprochene Grenzleistungsmaschine ist. Er dient nach dem Hochfahren des Generators als Erregermaschine in Parallelschaltung mit den Gleichrichtern, die ihn vorher gespeist haben. Beim Stoßkurzschluß schickt die Erregerwicklung des Generators einen Ausgleichsstrom bis zu 10 000 A in den Erregerkreis. Dabei sind die Gleichrichter durch Gittersteuerung gesperrt, so daß der ganze Ausgleichsstrom von der Gleichstrommaschine allein aufgenommen werden muß. Der Kollektor bewältigt diesen Überstrom ohne jede Feuererscheinung an den Bürsten. Motor und Gleichrichter wurden von der Maschinenfabrik der AEG geliefert.

Ein weiterer Vorteil des Gleichstromantriebes liegt in der einfachen Art der Drehzahleinstellung durch die Gittersteuerung der Gleichrichter, mit der die Frequenz beim Kurzschlußversuch bequem eingestellt werden kann. Es lassen sich nicht nur Frequenzen über die Nennfrequenz erzielen, die ja beim Drehstromantrieb nie genau erreicht werden kann, sondern auch 25 oder 16²/₃ Hz. Für diesen Fall ist man bei der Erregerleistung von der Drehzahl unabhängig, wenn man eine elektromagnetische Kupplung zwischen Kurzschlußgenerator und Antriebsmotor vorsieht und die Gleichstrommaschine kurz vor dem Versuch auf ihre Nenndrehzahl hochfährt. Um während der Stoßerregung die Drehzahl besser konstant halten zu können, wurde die Gleichstrommaschine mit einem Schwungrad versehen. Durch das Öffnen

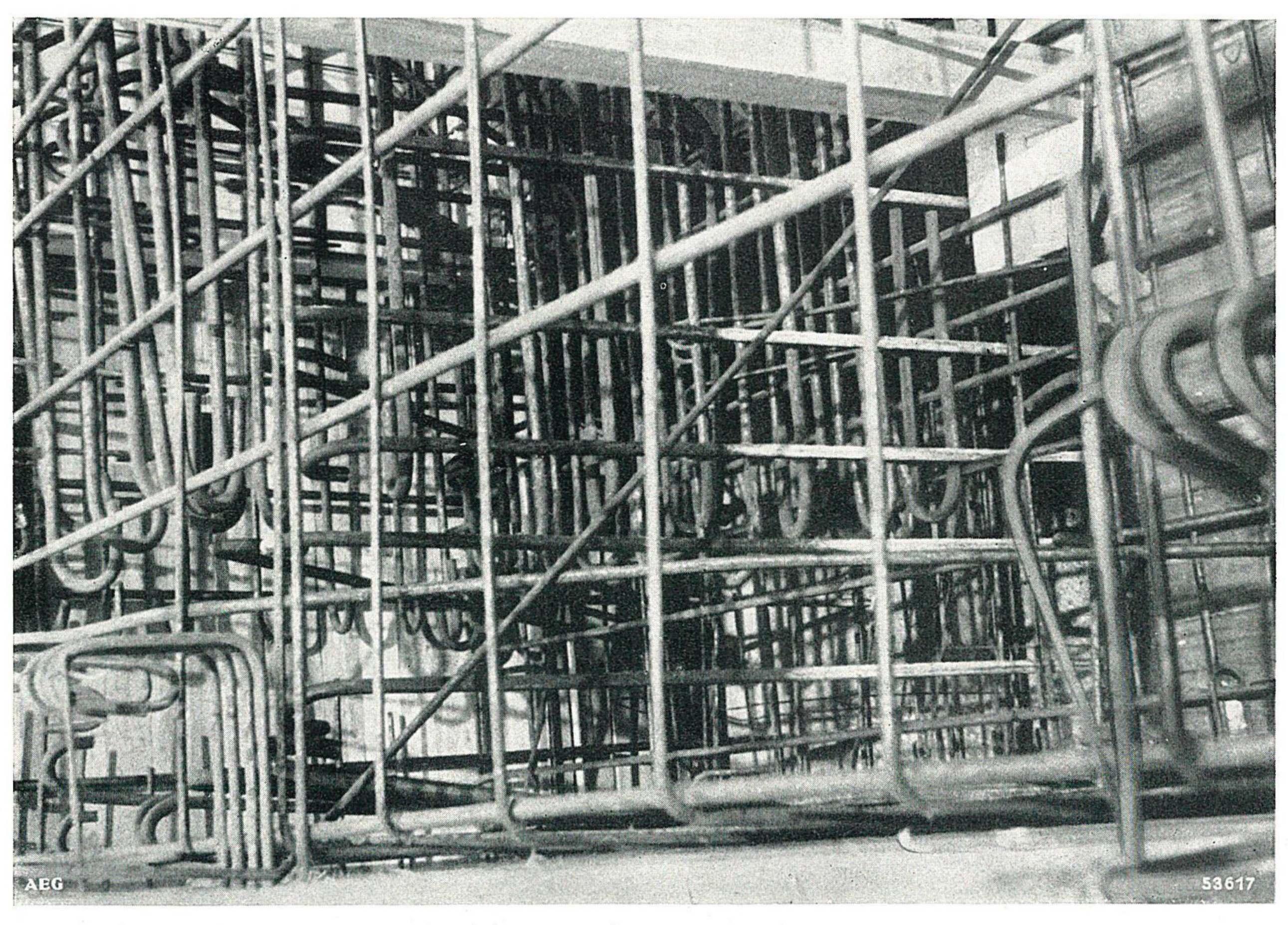


Bild 4. Die Eisenarmierung des Fundamentes für den 2000 MVA-Kurzschlußgenerator

der magnetischen Kupplung, die unmittelbar beim Generator sitzt, werden auch die mechanischen Stöße, die im Läufer beim Kurzschluß entstehen, von dem Übersetzungsgetriebe und von der Gleichstrommaschine ferngehalten.
Der angegebene Wert der Kurzschlußleistung des Generators von 2000 MVA versteht sich als symmetrische Ausschaltleistung, d. h. der Kurzschlußstrom ist ein reiner Wechselstrom ohne Gleichstromglied. Um dies bei der Schalterprüfung zu erreichen, muß entweder so lange gewartet werden, bis das stärker gedämpfte Gleichstromglied des Stoßkurzschlußstromes abgeklungen ist, oder man verhindert das Auftreten des Gleichstromgliedes dadurch, daß man einem Vorschlag von J. Biermanns den Kurzschluß in geeigneter Weise einleitet. Dies hat zusätzlich den Vorteil, daß der Kurzschluß viel schneller nach seiner Einschaltung wieder unterbrochen werden kann; infolgedessen unterscheiden sich die wiederkehrende Spannung und auch der Abschaltstrom nicht nennenswert von dem Leerlaufwert der Spannung bzw. dem Anfangswert des Wechselstromgliedes, was eine maximale Ausnutzung der von der Maschine zur Verfügung gestellten Stoßkurzschlußleistung ergibt. Das Fehlen des Gleichstromgliedes bedingt ferner eine ganz erhebliche Schonung von Maschine, Transformator und Verbindungsleitungen, wächst doch jede Stromkraftbeanspruchung mit dem Quadrat der Stromstärke.

Für den Generator mit Antrieb wurde ein gemeinsames Gewichtsfundament in der üblichen Tischform geplant. Im Kurzschluß müssen von dem Fundament Drehmomente bis zu 1000 mt aufgefangen werden, die dem von einer schweren D-Zug-Lokomotive an einem 10 m langen Hebelarm ausgeübten Drehmoment entsprechen. Demzufolge waren eine ungewöhnlich starke Eisenarmierung und besondere Widerlager für die Schrauben, die den Ständer direkt am Fundament festhalten, erforderlich (Bild 4). Schwierig in der Planung war ebenfalls die Auswahl des Kurzschlußtransformators, hing doch auch von dessen richtiger Auslegung der reibungslose Versuchsbetrieb ab. Mit Rücksicht auf größere Betriebsreserve wurden drei Einphasentransformatoren gewählt, da bei Ausfall einer Phase der Versuchsbetrieb immer noch zweiphasig weitergeführt werden kann. Diese Transformatoren werden unterspannungsseitig von den zwei Generatorwicklungen getrennt gespeist und nur magnetisch gekoppelt. Da die Transformatoren größten Kurzschlußströmen ausgesetzt sind, mußten besondere Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden. Jeder Transformator steht in einer eigenen festgemauerten Zelle mit Kohlensäure-Löscheinrichtung und Ölfanggruben. Rückseitig wurden diese Zellen durch ein die ganze Fläche der Wand einnehmendes Tor abgeschlossen, an dem das Anschlußgleis vorbeiführt.

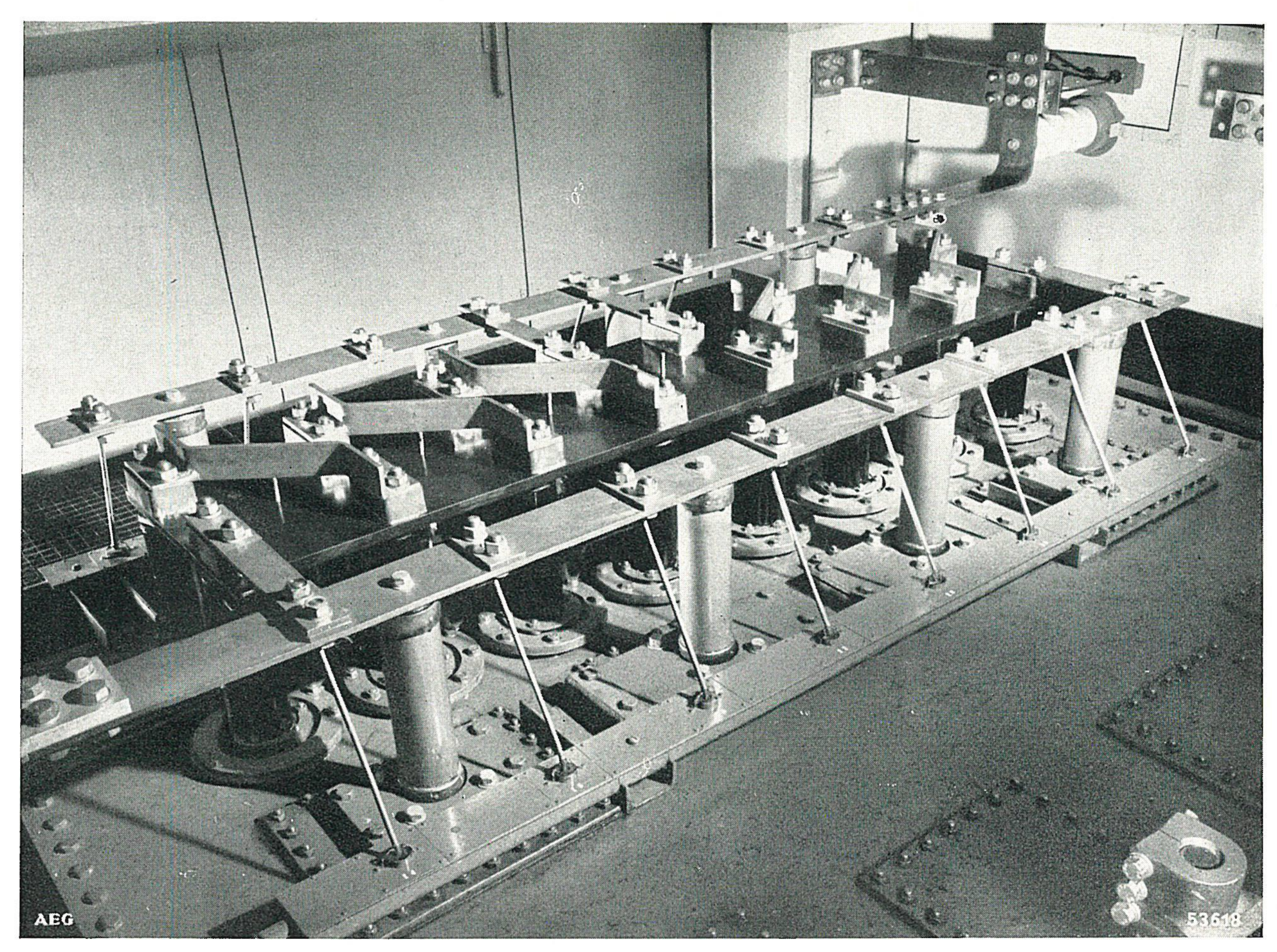


Bild 5. Umschaltlaschen mit Schaltungsüberwachung an einem der Kurzschlußtransformatoren

Die vielfache Umschaltmöglichkeit auf der Oberspannungsseite der Transformatoren machte den Einbau einer elektrischen Überwachung gegen Fehlschaltungen notwendig. Jeder zur Umschaltung der Transformatoren notwendigen Schaltlasche wurde über ein Isoliergestänge ein Niederspannungs-Stößelschalter zugeordnet (Bild 5). Damit kann die hochspannungsseitige Schaltung der Transformatoren über Niederspannungs-Hilfsstromkreise nachgebildet werden. Eine für jede Transformatorschaltung vorhandene Abbild-Steckvorrichtung sorgt für die notwendige Kontrolle und Sicherheit. Erst wenn alle drei Transformatoren gemäß der Kommandogabe richtig geschaltet sind, wird die Versuchsanlage für den Versuch freigegeben.

Da man nicht immer mit der vollen Kurzschlußleistung des Generators arbeitet, braucht man umschaltbare Drosselspulen, am besten zwischen Generator und Transformator, die in Hartpapierkonstruktion ausgeführt sind. Sie wurden so angeordnet, daß im Falle ihrer Überbrückung eine schleifenlose Strombahn entsteht.

Höchste Werte an Kurzschlußleistungen lassen sich nur bei Vermeidung aller schädlichen Induktivitäten erzielen. Da hier schon die Selbstinduktion bei üblicher Verlegung mit blanken Schienen gestört hätte, wurden die Leitungen zwischen den Apparaten kabelartig isoliert und in kleinem Abstand verpackt geführt. Natürlich ergeben sich dadurch ungeheure Abstoßungskräfte, die bis zu 25 000 kg je laufenden Meter betragen; bei solchen Kräften war es notwendig, die Leiter durch Zwingen aus U-Eisen zusammenzuhalten (Bild 6).

Die Freiluftversuchsstände wurden möglichst regengeschützt als einseitig offene, überdachte, nebeneinander liegende Zellen ausgeführt. Die Betonwände mußten ausreichend widerstandsfähig gegen etwa vorkommende Explosionen sein.

Gegenüber den Versuchsständen liegt der Beobachtungsraum, von dem aus alle Vorgänge an den Versuchsgeräten gut zu beobachten sein müssen. Der Abstand war mit Rücksicht auf die bei Versagen des Prüflings auftretenden Auswirkungen genügend groß zu wählen. Es mußten Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden, um Unfälle durch Splitterteile zu verhindern, ohne daß die Beobachtungsmöglichkeit darunter litt. Für besonders schwere und gefährliche Versuche — beispielsweise an Ölschaltern — wurde eine mit Erdwällen umgebene Versuchsgrube geschaffen.

Das Schalthaus wird links durch die Transformatorzellen, rechts durch die Freiluftversuchsstände eingerahmt. Die von beiden Generatorwicklungen kommenden getrennten Drehstromleitungssysteme werden vor den schon erwähnten Strombegrenzungs-Drosselspulen über einen sechspoligen Sicherheitsschalter und den

sechspoligen Draufschalter geführt. Vom Sicherheitsschalter, der ein Druckgasschalter verstärkter Bauart ist, wird verlangt, daß er die vom Generator zur Verfügung gestellte höchste Kurzschlußleistung beherrscht, d. h. daß er Ströme bis 200 kA bei einer Spannung von 7,5 kV schaltet. Der Schalter hatte bereits des öfteren Gelegenheit, seine Leistungsfähigkeit unter Beweis zu stellen.

Der Draufschalter, ein sechspoliger Luftschalter mit Messerkontakten und Druckluftantrieb, muß die äußerst hohen Stoßkurzschlußströme des Generators in einem vorbestimmten Augenblickswert der Spannung bei hoher Lebensdauer seiner Kontakte einschalten können. Seine besondere Aufgabe ist es, den auf die vorgeschriebene Spannung erregten Generator auf den bereits kurzgeschlossenen Versuchsschalter zu schalten, sofern dieser auf sein Ausschaltvermögen hin untersucht werden soll. Die erste Forderung verlangt eine robuste Bauart des Schalters, die zweite aber äußerste Konstanz des ganzen kinematischen Ablaufes; beide Forderungen sind schwer miteinander in Einklang zu bringen. Durch die Wahl eines Druckluftantriebes mit sehr hohem Kraftüberschuß und durch gedrängte Anordnung, besondere Ausführung der Betätigungsventile und eine von der Generatorwelle abgeleitete lichtelektrische Steuerung konnte erreicht werden, daß der vorgeschriebene Einschaltzeitpunkt mit einer Genauigkeit von ±0,3 ms, das sind etwa ±5° el, eingehalten wird.

Die vom Draufschalter kommenden Leitungen werden über die Drosselspulen geführt und teilen sich dann so, daß sie entweder zu den Unterspannungswicklungen der Transformatoren oder direkt nach einer Versuchszelle hin geschaltet werden können. Von den Transformatoren führen oberspannungsseitige Leitungsschienen als Sammelschienen an der Rückseite der Versuchszellen entlang; sie sind jeweils mit Anschlußfahnen versehen, an die je nach Wahl die fünf verschiedenen Versuchszellen oder über zwei parallel geschaltete 30 kV-Kabel der oben beschriebene geschlossene Versuchsraum angeschlossen werden können.

Den restlichen Raum des Schalthauses nehmen die für die Weil-Schaltung benötigten umfangreichen Einrichtungen ein, deren Beschreibung einem der folgenden Beiträge vorbehalten ist.

Neben dem Beobachtungsraum befindet sich noch ein größerer, von diesem aus übersehbarer, geschlossener, mit Deckenheizung versehener Versuchsraum, in dem Abschaltversuche bis etwa 400 MVA durchgeführt werden können. Dieser Versuchsraum bietet Vorteile insbesondere bei schlechter Witterung und bei Versuchsreihen, die sich über längere Zeit erstrecken. In diesem Raum ist noch ein Hochstromtransformator zu sehen, der bei Spannungen von 1200 bis 180 V Kurzschlußströme bis 400 000 A zur Verfügung stellt. Der Hochstromtransformator ist in erster Linie für die Untersuchung von Niederspannungsschaltern und für die Untersuchung der Stromleitfähigkeit von Kontakten bestimmt. Er wird im allgemeinen von einem im Hilfsmaschinenraum (Bild 7) aufgestellten 1500 kVA-Generator gespeist werden, so daß diese Versuche den Betrieb des

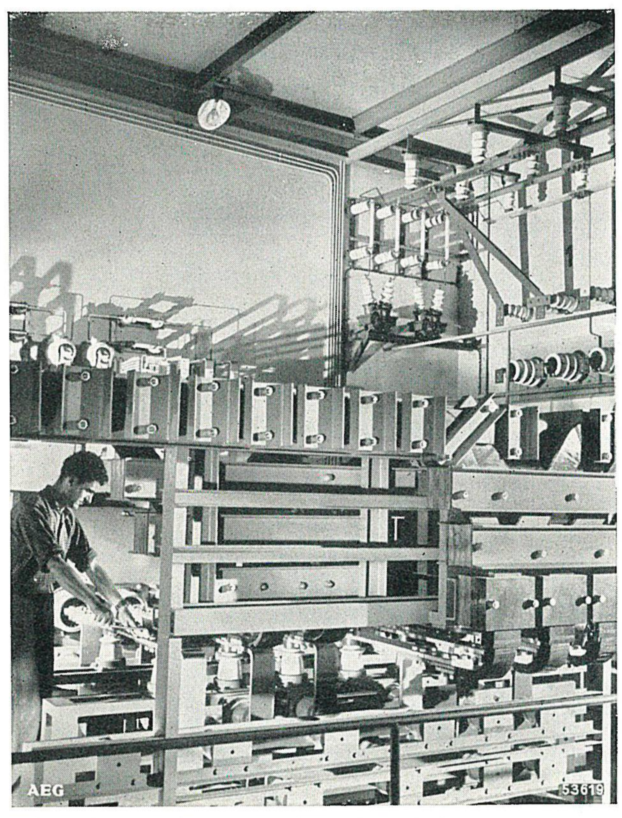


Bild 6. Abstützung der Leitungen des Hochstromkreises

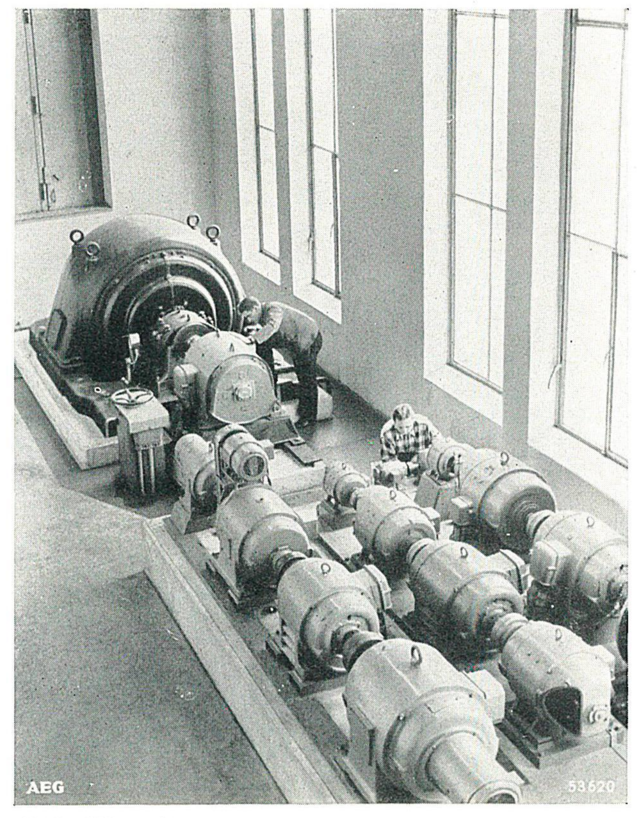


Bild 7. Hilfsmaschinenraum

eigentlichen Hochleistungs-Versuchsfeldes nicht weiter stören. In dem Raum wird ferner noch ein Transformator für eine höchste Spannung von 15 kV aufgestellt werden, der in Verbindung mit dem 1500 kVA-Generator Versuche an kleinen Schaltermodellen ermöglichen wird, ferner Versuche mehr physikalischer Natur, die sich mit den Eigenschaften des Unterbrechungs-Lichtbogens beschäftigen.

Auch der zweite Teil des Institutes, das Hochspannungs-Versuchsfeld, stellte interessante Aufgaben bei der Planung. Hier werden hohe Räume benötigt, deren Abmessungen von den höchsten geforderten Spannungen abhängen. Es ist zweckmäßig, zwei Versuchsräume, einen großen und einen kleineren, vorzusehen. Auf diese Weise können mehrere Versuche ohne gegenseitige Störung gleichzeitig durchgeführt werden, und die einzelnen Räume lassen sich besser speziellen Aufgaben anpassen.

Die Planung hatte sich mit einer störungsfreien Aufstellung der einzelnen Geräte unter Schaffung eines möglichst großen Versuchsplatzes zu befassen. Diese Aufgabe wurde mit einem Modell gelöst (Bild 8).

Wenn auch die meisten Versuche im Dunkelraum zur optischen Feststellung von Glimmeinsatz und Gleitfunkenbildung vorgenommen werden müssen, so ist doch für die stundenlangen Vorbereitungs- und Umbauarbeiten Tageslicht sehr erwünscht. Daher wurde der Hochspannungsraum mit Fenstern versehen, und es war sehr darauf zu achten, daß einwandfreie Verdunklungseinrichtungen angebracht wurden.

Da Hochspannungsentladungen leicht Rundfunkstörungen verursachen, mußte der Raum nach dem Prinzip des Faraday'schen Käfigs elektrisch abgeschirmt werden. Hierfür genügte, wie nachträgliche Kontrollmessungen ergaben, ein einfaches in die Betonwände des Raumes sowie in Decke und Fußboden eingegossenes Eisendrahtgitter mit 15 cm Maschenweite, das an den vier Ecken des Raumes an die allgemeine „Erde" des Institutes angeschlossen wurde.

Alle Versuchsräume sind mit an den Wänden angebrachten Anschlußtafeln versehen (Bild 9), auf die mit den im Höchstspannungsraum untergebrachten Linienwähler (Bild 10) sämtliche im Hilfsmaschinenraum aufgestellten Stromerzeuger, unter denen sich auch ein 500 Hz-Generator für 100 kVA befindet, geschaltet werden können. Sämtliche Versuchsräume sind ferner mit Anschlüssen für Gas, Wasser und Druckluft versehen.

In einem an den Höchstspannungsraum grenzenden besonderen Anbau ist noch ein Klimaraum vorhanden, in dem bei willkürlich einstellbaren Feuchtigkeitsverhältnissen Temperaturen zwischen —40° und +80° aufrecht erhalten werden können. Die Größe des Klimaraumes ist ausreichend, um einen 220 kV-Druck-

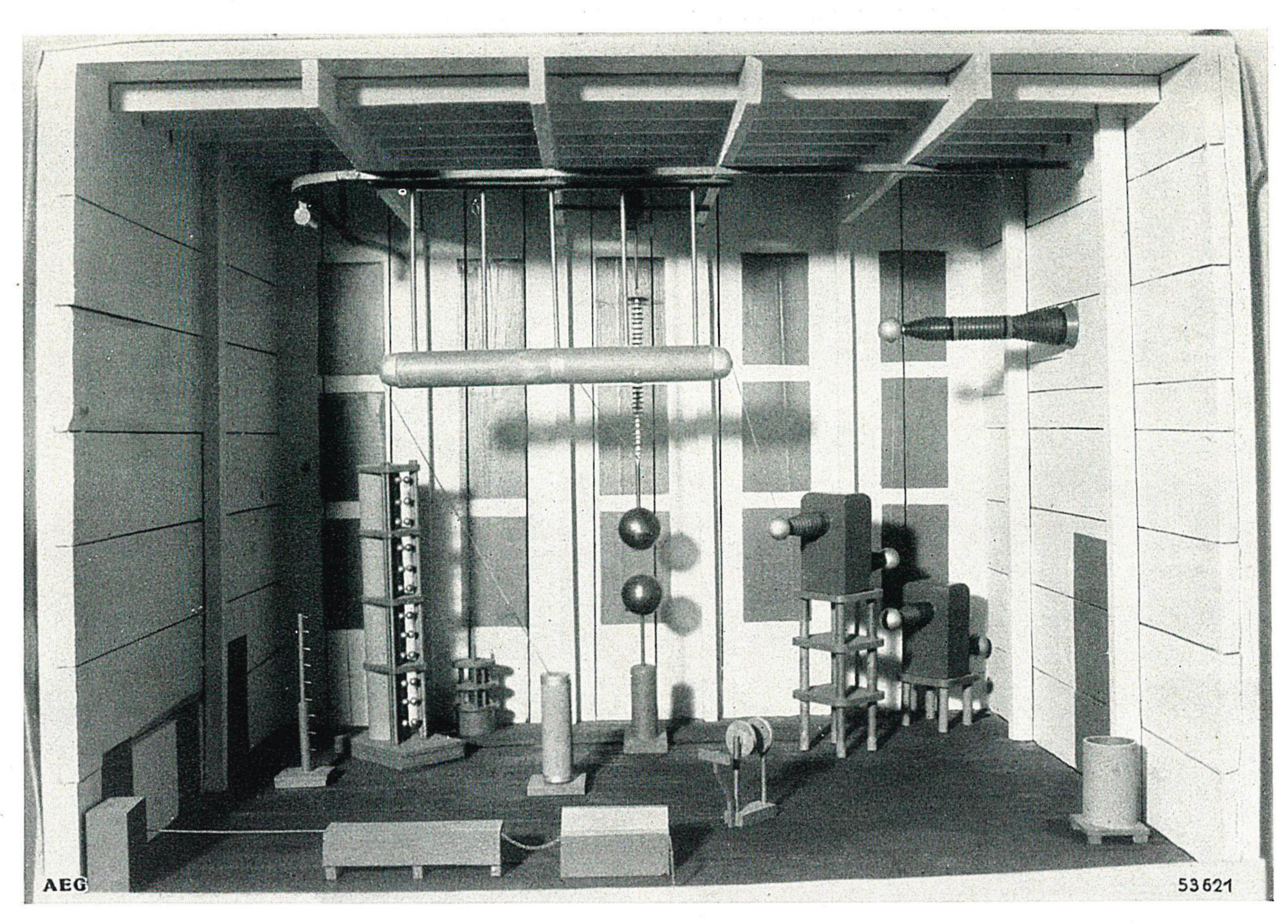
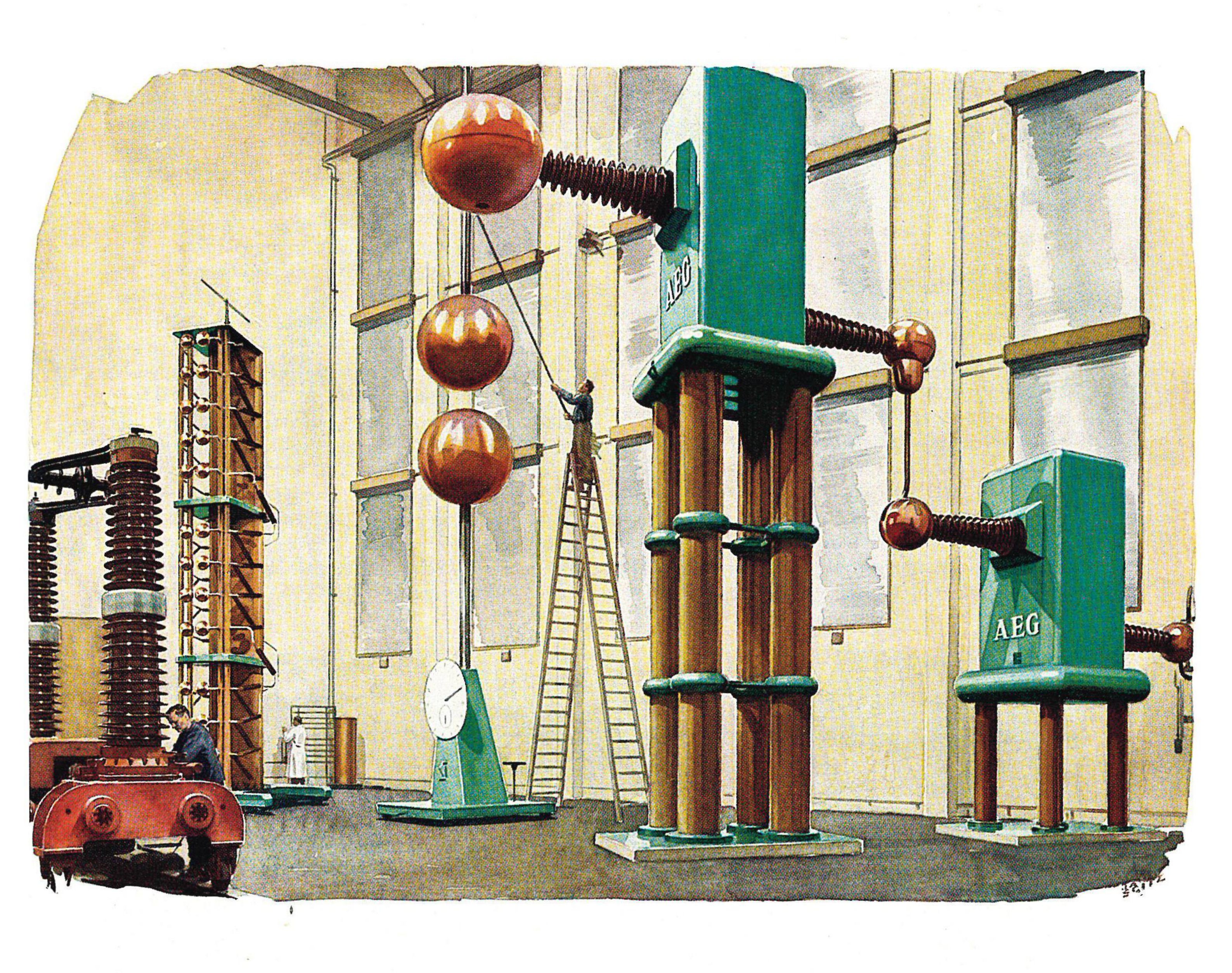


Bild 8. Modell des Hochspannungsraumes



Das Hochspannungs-Versuchsfeld im Hochspannungs-Institut der AEG

Rechts die Prüftransformatoren in Kaskadenschaltung für 1200 kV und 1200 kVA, in der Mitte Kugelfunkenstrecke mit 1500 mm Kugeldurchmesser und links — zwischen Kugelfunkenstrecke und Freistrahlschalter im Vordergrund — Stoßspannungsgenerator für 3000 kV und 31,5 kWs

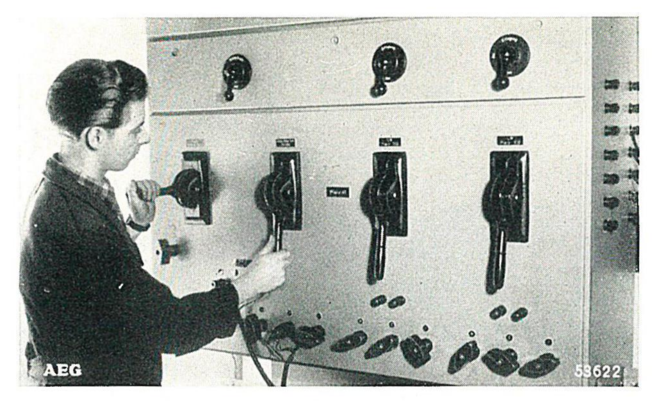


Bild 9. Anschlußtafel in einem der Versuchsräume

gasschalter in ihm aus sein Verhalten sowohl in arktischen als auch in tropischen Gegenden untersuchen zu können.

Besondere Aufmerksamkeit mußte der Planung und der Ausführung der Erdungsanlage des ganzen Institutes gewidmet werden. Im Hochleistungs-Versuchsfeld können bei Isolationsschäden Ströme von vielen 10 000 A in die Erde übertreten, aber auch beim großen Stoßgenerator des Hochspannungs-Versuchsfeldes handelt es sich um Ströme von vielen 1000 A, die wegen ihres steilen zeitlichen Verlaufes viel Unheil anrichten würden, wenn sie im Institut vagabundieren könnten. Durch Anlage von Tiefbrunnen und ausgedehnten Band-Erdern konnte zwar ein resultierender Erdungswiderstand von 0,1 Ohm erreicht werden. Bei 100 000 A ergibt das immerhin eine Potentialdifferenz von 10 kV. Deshalb war es notwendig, das ganze Institut mit dicken, gut unter sich und mit allen Erdungsstellen verbundenen Schienen zu durchziehen, an die alle Stromerzeuger einschließlich der Stoßgeneratoren, aber auch alle Versuchsgegenstände, alle Schalttafeln, Schaltpulte und alle Geräte und Gegenstände, die irgendwie von Menschen berührt werden können, anzuschließen waren. An diese Erdungsanlage wurden auch Gas- und Wasserleitungen, Licht- und Fernsprechanlage, kurz alles, was irgendwie Strom leiten könnte, angeschlossen, so daß nach menschlichem Ermessen zwischen irgendwelchen Punkten des Institutes keine gefährlichen Spannungsdifferenzen auftreten können. Um Verseuchungen der Umgebung mit unerwünschten Spannungen zu vermeiden, wurde das ganze Institut gegen seine Umgebung elektrisch abgeriegelt; dies geschah dadurch, daß alle einmündenden Gas-, Wasser- und Druckluftleitungen durch eingesetzte Porzellanrohrstücke und daß alle elektrischen Verbindungsleitungen, zu denen auch die Fernsprechleitungen gehören, durch Transformatoren abisoliert wurden. So erhielt das Institut eine eigene Fernsprechvermittlungsstelle und einen eigenen Hochspannungsanschluß.

Bild 11. Vortragssaal

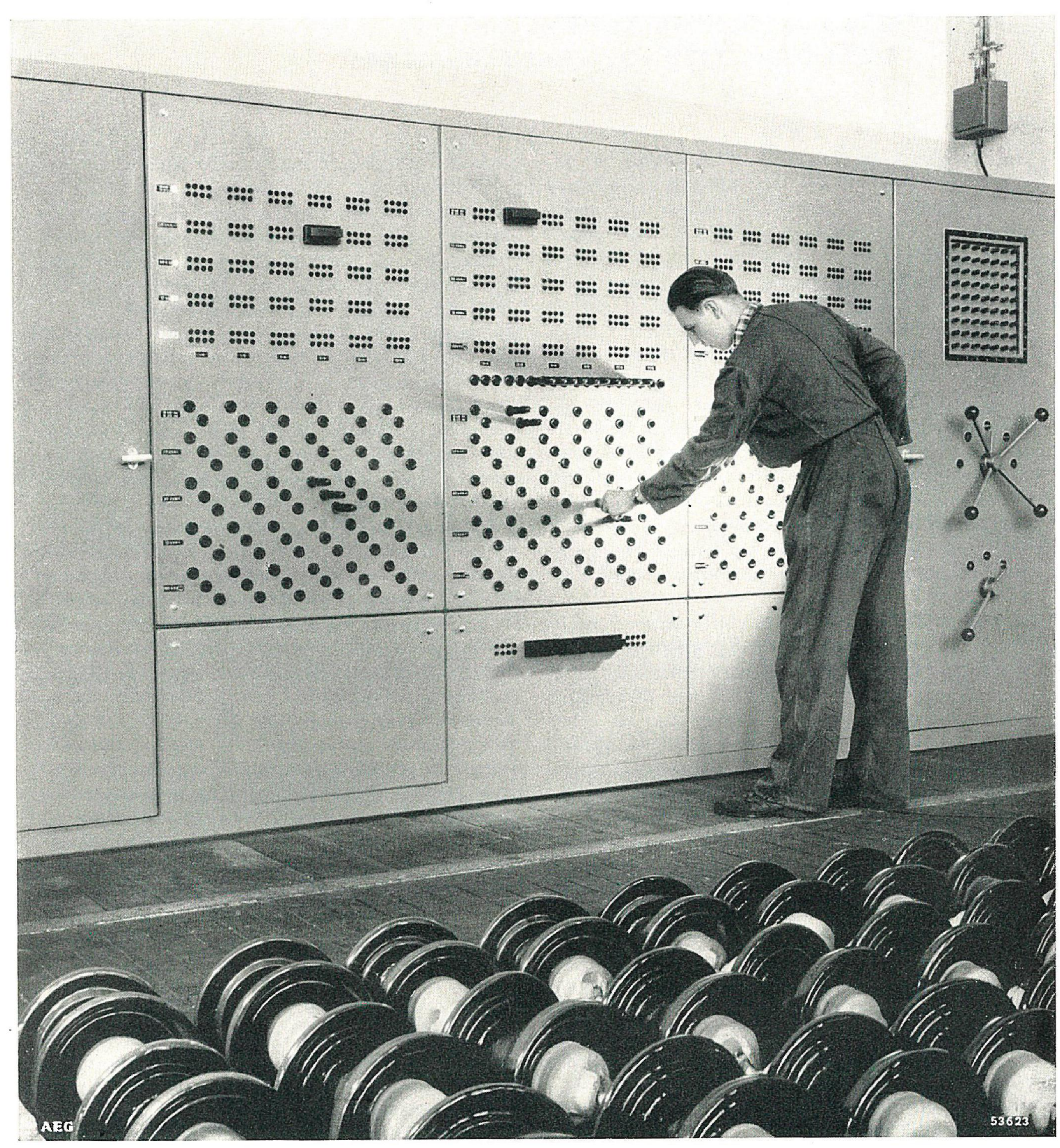


Bild 10. Linienwähler

Die Büroräume einschließlich des Besprechungszimmers wurden in einem besonderen Gebäudeteil zusammengefaßt. Der Vortragssaal mit 140 Sitzplätzen (Bild 11) und allen Einrichtungen zur Vorführung von Filmen und Diapositiven befindet sich in zentraler Lage im ersten Stockwerk.

Als weitere notwendige Räume sind zu erwähnen: eine Werkstatt für die Anfertigung kleinerer Versuchsstücke und Hilfseinrichtungen sowie für die Ausführung kleinerer Reparaturen, ferner Umkleide-, Wasch- und Duschräume für die Belegschaft und endlich Lagerräume für Hilfsmaterial und Versuchsstücke sowie ein Archivraum, die sämtlich im Keller untergebracht sind.

Es bedarf keiner besonderen Erwähnung, daß praktisch alle Maschinenanlagen und elektrischen Einrichtungen des Institutes in den Fabriken unseres Unternehmens hergestellt wurden.

Schrifttum

1) G. Dobke: Die Ermittlung der Grenzleistung von Eisenstromrichtern. AEG-Mitt. 41 (1951) 9/10, S. 175—176.

DER KURZSCHLUSSGENERATOR DES HOCHLEISTUNGS-VERSUCHSFELDES

Günther Nimsch

DK 621.312.12.014.3:621.317.2.026.44

Die Bereitstellung von Kurzschlußleistung in gewünschter Höhe für ein Hochleistungs-Versuchsfeld erfolgt durch den Kurzschlußgenerator, der heute allgemein als Synchronmaschine mit verteilter Erregerwicklung, mithin als Turbogenerator, ausgeführt wird. Während jedoch der Entwurf von Turbogeneratoren für die öffentliche Stromversorgung darauf abzielt, den plötzlichen Kurzschlußstrom möglichst niedrig, jedenfalls in den von den VDE-Vorschriften zugelassenen Grenzen, zu halten, kommt es beim Kurzschlußgenerator darauf an, ohne Rücksicht auf sonstige Eigenschaften der Maschine den Einschaltwert des Kurzschlußstromes möglichst groß zu machen und ihn während der Zeitdauer bis zum Ausschalten auf diesem Wert zu halten. Es ist deshalb klar, daß der Entwurf eines solchen Generators in rechnerischer und konstruktiver Hinsicht nach grundsätzlich anderen Überlegungen als der einer normalen Maschine erfolgen muß.

In gleicher Weise wie der Bau von Turbogeneratoren hat auch der Bau von Kurzschlußgeneratoren, für den die Turbinenfabrik zuständig ist, innerhalb der AEG seine Geschichte, die durch die mitunter stürmisch zu nennende Steigerung der Leistung der zu untersuchenden Hochspannungsschalter im Laufe der Zeit beständig neue Impulse erhielt. Die erste Maschine dieser Art wurde im Jahre 1927 für das Hochleistungs-Versuchsfeld der AEG-Transformatorenfabrik in Berlin-Oberschöneweide gebaut. Die Einschaltleistung dieses Generators betrug 1000 MVA, seine Ausschaltleistung nach drei Halbwellen etwa 500 MVA. Nach dem damaligen Stand der Technik mußte diese Maschine als vierpoliger Turbogenerator gebaut werden, seine Abmessungen entsprachen den Möglichkeiten, welche die Beschaffung und Bearbeitung der Induktorkörper um diese Zeit offen ließen. Die Verminderung der Reaktanz zur Vergrößerung der Kurzschlußleistung wurde in erster Linie durch eine Steigerung des Flusses erzielt, wobei man auf besondere konstruktive Maßnahmen zur Erhöhung des Kurzschlußstromes verzichtete.

Die rasch anwachsende Ausschaltleistung der Schalter stellte das Hochleistungs-Versuchsfeld vor Aufgaben, für deren Bewältigung dieser Generator, der über 15 Jahre zur Zufriedenheit gearbeitet hatte, offensichtlich nicht mehr ausreichte. Deshalb wurde im Jahre 1940 mit der Vorarbeit für den Entwurf eines zweiten Kurzschlußgenerators begonnen, der in dem neu zu erstellenden Hochspannungsinstitut in Berlin-Oberschöneweide zur Aufstellung kommen sollte. Der Plan ging dahin, eine Maschine von etwa 1000 MVA-Abschaltleistung zu bauen, wobei unter Ausschaltleistung das Produkt aus Kurzschlußstrom und wiederkehrender Spannung nach fünf Halbwellen zu verstehen ist. Auf die konstruktiven Einzelheiten dieses Generators kann hier leider nicht näher eingegangen werden. Er wurde zweipolig und mit den mit Rücksicht auf die mechanische Beanspruchung größtmöglichen Abmessungen ausgeführt, wobei auch zusätzliche Hilfsmittel zur Erhöhung des Kurzschlußstromes, wie ein Kurzschlußkäfig zur Verminderung der Stirnstreuung, sowie eine Stoßerregung in beschränktem Umfang zur Verwendung kamen.

Der unglückliche Ausgang des Krieges verhinderte die Inbetriebsetzung dieses bereits fertiggestellten Kurzschlußgenerators, wodurch es unmöglich wurde, die vorgesehenen Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit zu prüfen. Außerdem gingen aber auch die wichtigsten Unterlagen des Entwurfes verloren, so daß bei den Überlegungen für den Bau des dritten Kurzschlußgenerators, die etwa im Jahre 1949 in Angriff genommen wurden, völlig von vorn angefangen werden mußte. Die Zielsetzung für den Entwurf dieser Maschine, welche die Kurzschlußleistung für das neue Hochleistungs-Versuchsfeld der AEG in Kassel bereitstellen sollte, war etwa die gleiche wie beim zweiten Generator; es sollte eine Ausschaltleistung von etwa 1200 MVA nach 3,5 Halbwellen erreicht werden. Die zur Verfügung stehenden technischen Mittel waren jedoch erheblich geringer. Der Entwurf war von vornherein an ein vorhandenes, zu diesem Zeitpunkt einzig zur Verfügung stehendes Induktorschmiedestück gebunden, das zu einem Turbogenerator für eine Einheitsleistung von 50 MVA gehörte. Während also bei der früheren Maschine die Erhöhung der Kurzschlußleistung im wesentlichen durch eine Vergrößerung der Maschinenabmessungen erreicht worden war, sollte dieser dritte Generator etwa die gleiche Leistung bei nur etwa 60 % des Maschinenvolumens des zweiten Generators abgeben. Es ist deshalb einleuchtend, daß beim Entwurf dieser Maschine hinsichtlich der Ausnutzung des aktiven Materials und der Maßnahmen zur Erhöhung des Kurzschlußstromes grundsätzlich neue Wege beschritten werden mußten.

Die zur Anwendung gelangten Mittel, mit welchen das gewünschte Ziel einer Ausschaltleistung von 1200 MVA nicht nur erreicht, sondern erheblich überschritten wurde, können in vier verschiedene, nicht unmittelbar miteinander in Zusammenhang stehende Gruppen unterteilt werden.

Zunächst wurden die bei gewöhnlichen Turbogeneratoren mit Rücksicht auf die zulässige Erwärmung unentbehrlichen radialen Luftschlitze innerhalb des Blechpaketes weggelassen. Durch diese Maßnahme, die wegen der nur stoßweisen Belastung des Kurzschlußgenerators unbedenklich erfolgen kann, wird die Ausnutzung der gegebenen Maschinenabmessungen um etwa 25 % erhöht, was in vollem Umfange der Steigerung des Flusses und damit des Stoßkurzschlußstromes und der wiederkehrenden Spannung zugute kommt.

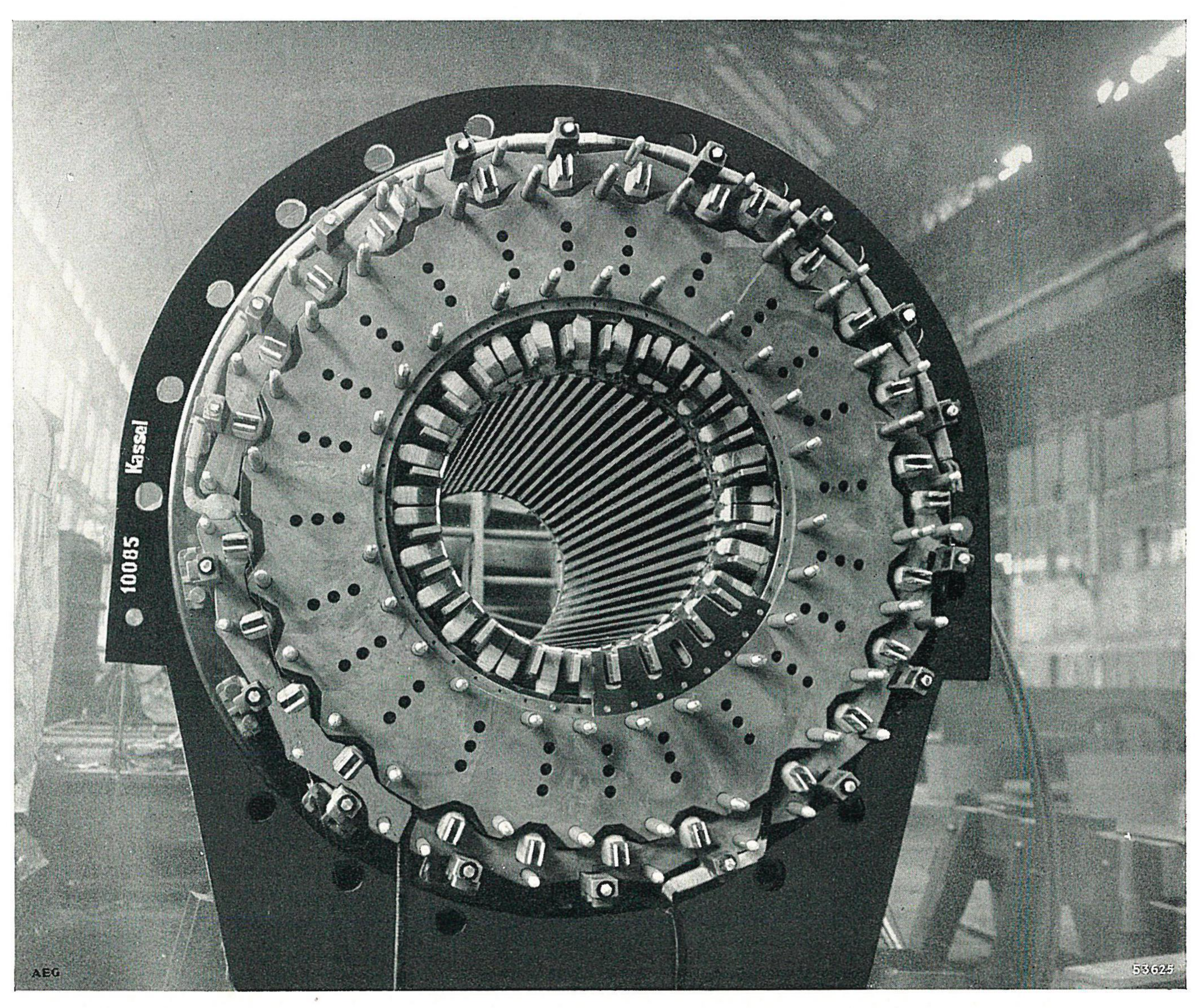


Bild 1. Kurzschlußkäfig zur Verringerung der Stirnstreuung

In der gleichen Richtung wie die Verbesserung der Ausnutzung wirkt eine Steigerung des Flusses durch Verstärkung der Erregung vor dem Einleiten des Kurzschlusses, also durch eine Stoßerregung. Die Möglichkeiten einer Erhöhung der Kurzschlußleistung durch Stoßerregung sind nur begrenzt durch die Lage der Leerlaufkennlinie des Generators sowie durch eine entsprechende Dimensionierung des Erregerkreises. Bei dem Entwurf des neuen Kurzschlußgenerators wurden infolgedessen die magnetischen Beanspruchungen niedrig gehalten, um die Leerlaufkennlinie in ihrem gekrümmten Teil aufzurichten. Der Erregerkreis wurde durch eine neuartige Anordnung, auf die später noch einzugehen sein wird, so reichlich vorgesehen, daß im Augenblick des Kurzschlusses ein hoher Erregerspannungsüberschuß zur Verfügung steht. Die Vorausberechnung ergab, daß mit diesen Hilfsmitteln eine Stoßerregung auf 160 % des normalen Flusses möglich sein würde, bei der Ausführung wurde dieser Wert nicht unerheblich überschritten.
Die weitere Durchrechnung des Kurzschlußgenerators mußte sich mit der Frage beschäftigen, mit welchen Hilfsmitteln der Endwert der den plötzlichen Kurzschlußstrom begrenzenden Reaktanz durch Verkleinerung der einzelnen Streuleitfähigkeiten herabgesetzt werden kann. Es darf hier als bekannt vorausgesetzt werden, durch welche Streufaktoren die Höhe und der Verlauf des Wechselstromgliedes des plötzlichen Kurzschlußstromes bedingt werden. Man unterscheidet hier die Stoßkurzschluß-Reaktanz (transient reactance) sowie die flüchtige Stoßkurzschluß-Reaktanz (subtransient reactance); jene setzt sich aus der Streuung der Stator- und Läuferwicklung, diese aus der Streuung von Stator- und Dämpferwicklung zusammen. Die Auswertung von Stoßkurzschluß-Oszillogrammen läßt klar erkennen, daß sich dem nach einer Exponentialfunktion abklingenden Kurzschlußstrom während der ersten Halbwellen noch ein zusätzlicher Anteil überlagert, der nach einer anderen Zeitkonstante verläuft. Für den ersten Momentanwert im Augenblick des Kurzschlusses ist deshalb die sich aus Stator- und Dämpferwicklungsstreuung zusammensetzende flüchtige Stoßkurzschluß-Reaktanz maßgebend.

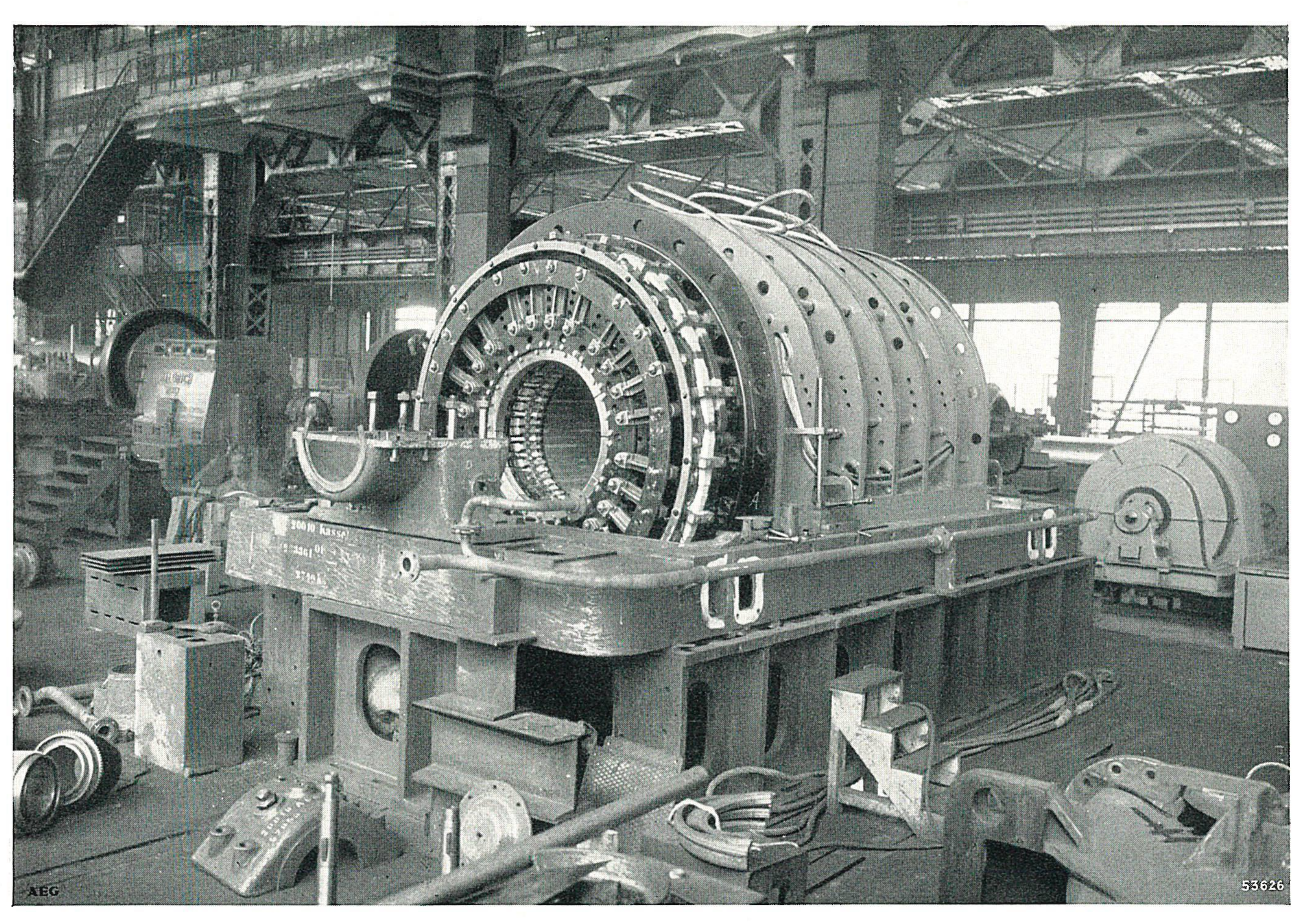


Bild 2. Wicklungsversteifung des Kurzschlußgenerators

Die zahlenmäßige Überprüfung der Streuleitfähigkeit der Statorwicklung, die den Hauptanteil der gesamten Reaktanz bildet, auf die Möglichkeit zur Verkleinerung, weist zwangsläufig auf die Stirnstreuung hin, da diese ja in voller Höhe in den ersten Augenblickswert des Kurzschlußstromes eingeht, während bei der Nutenstreuung durch die während des Kurzschlusses auftretenden hohen Zahnsättigungen ohnehin eine Induktivitätsverminderung im gewünschten Sinne erfolgt. Es ist daher schon seit geraumer Zeit bekannt, das Stirnstreufeld der Statorwicklung von Kurzschlußgeneratoren durch einen besonderen Kurzschlußkäfig abzudämpfen. Ein derartiger Kurzschlußkäfig war bereits bei dem zweiten von der Turbinenfabrik entworfenen Kurzschlußgenerator vorgesehen worden, indem man auf den Stirnflächen des Stators Kupferringe angebracht hatte. Obgleich die Wirksamkeit dieser Maßnahme an der fertigen Maschine nicht mehr überprüft werden konnte, hatte doch ein Modellversuch ergeben, daß ein Kurzschlußkäfig dieser Art das Stirnstreufeld des Stators nur auf etwa 80 % seines Ursprungswertes vermindern konnte. Es wurde deshalb beschlossen, bei dem neuen Kurzschlußgenerator noch einen Schritt weiter zu gehen und die in zwei Ebenen angeordneten Stirnverbindungen des Stators mit Hilfe von drei nebeneinander liegenden Kurzschlußringen vollständig einzupacken. Es durfte erwartet werden, daß das Stirnstreufeld unter dem Einfluß eines derartigen Dämpferkäfigs beim plötzlichen Kurzschluß auf die Hälfte seines rechnerischen Wertes zurückgehen würde (Bild 1).

Wie wir oben gesehen haben, erfolgt der Verlauf des Stoßkurzschlußstromes entsprechend den Zeitkonstanten der Stoßkurzschluß- und der flüchtigen Stoßkurzschluß-Reaktanz, soweit es sich um Maschinen mit Dämpferwicklung handelt. Die Notwendigkeit einer vollständig verteilten Dämpferwicklung für Kurzschlußgeneratoren wurde deshalb schon verhältnismäßig frühzeitig erkannt, und die modernen Maschinen dieser Art sind mit einer solchen Wicklung ausgeführt. Da aber für die Leistungsprüfung von Hochspannungsschaltern nicht die Einschaltleistung, sondern die Ausschaltleistung nach etwa drei bis fünf Halbwellen maßgebend ist, kommt dem Verlauf des Kurzschlußstromes während der ersten Perioden, also der Zeitkonstanten der flüchtigen Stoßkurzschluß-Reaktanz entscheidende Bedeutung zu. Während bei Turbogeneratoren für die öffentliche Stromversorgung die Dämpferwicklung nur etwa 5 % des in den Rotornuten zur Verfügung stehenden Wickelraumes einnimmt, wurde dieser Wert bei der neuen Maschine auf etwa 40 % erhöht, was um so leichter geschehen konnte, als die Erregerwicklung, die nur für eine vorübergehende Stoßerregung im Leerlauf bemessen zu werden brauchte, bequem in dem restlichen, 60% ausmachenden Wickelraum untergebracht werden konnte. Die rechnerische Nachprüfung dieser Anordnung ergab, daß der Stoßkurzschlußstrom, statt auf

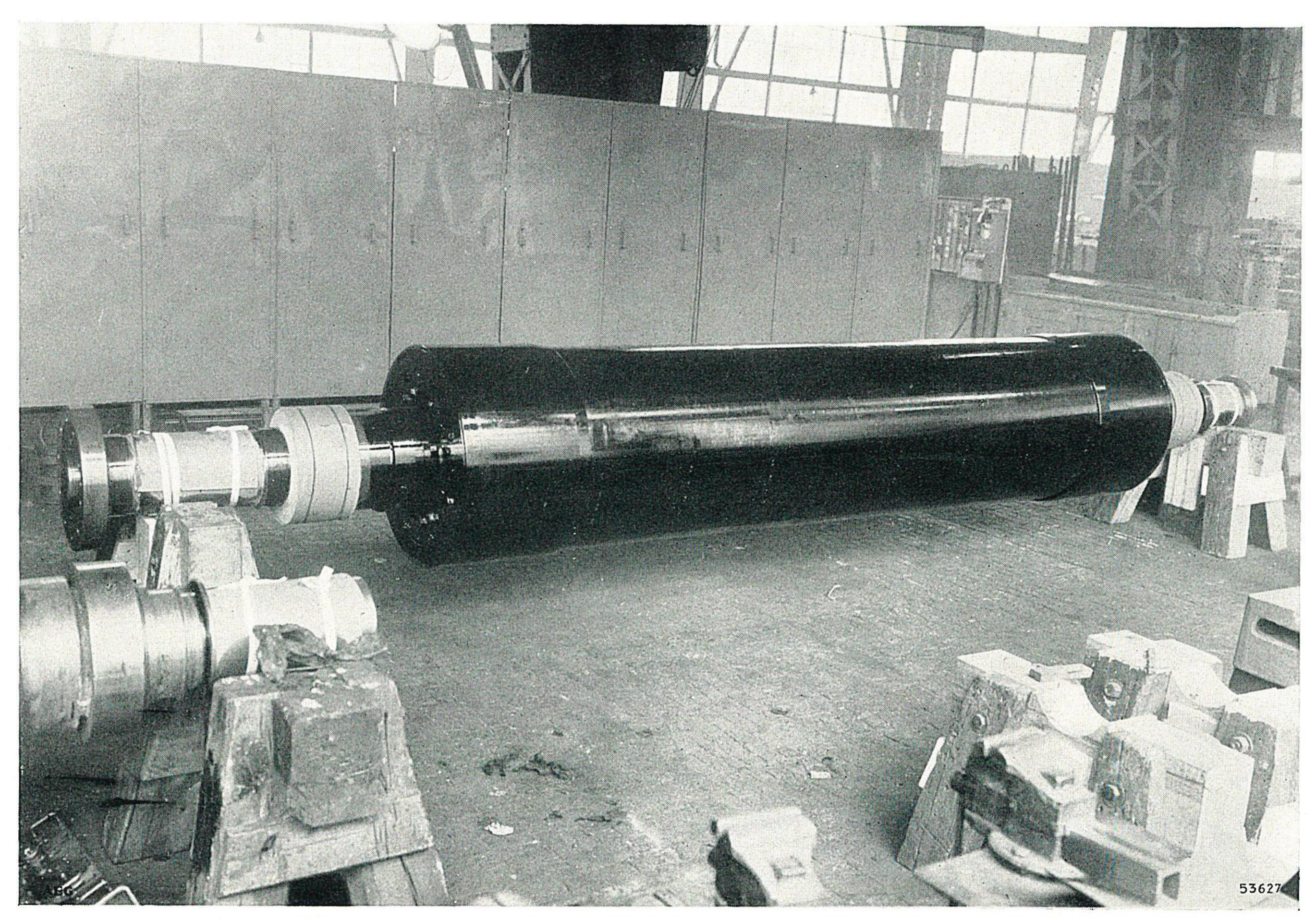


Bild 3. Induktor des Kurzschlußgenerators in der Werkstatt

80% seines Anfangswertes nach fünf Halbwellen abzuklingen, noch etwa 90% beträgt, während die wiederkehrende Spannung gleichfalls auf den Wert von 90% ansteigt, gegenüber etwa 80% bei dem Generator mit der schwachen Dämpferwicklung. Es ergibt sich also durch diese Anordnung eine Vergrößerung der Ausschaltleistung von 25%, ohne daß hierbei der Einschaltstrom durch Änderung der Reaktanz in nennenswertem Umfang beeinflußt wird.

Nach Klärung dieser grundsätzlichen Maßnahmen bot die weitere rechnerische und konstruktive Durcharbeitung der Maschine keine nennenswerten Schwierigkeiten mehr. Mit Rücksicht auf die hohe Stoßerregung und die zur Zeit des Baues noch schwierige Versorgungslage mit hochwertigen Isolationsmaterialien entschied man sich für die verhältnismäßig niedrige Nennspannung von 4 kV, die zugleich den Vorteil hatte, annähernd die volle Kurzschlußleistung für die Prüfung von 6 kV Schaltern an den Klemmen zur Verfügung zu stellen. Die Wicklung besteht aus zwei parallelen Kreisen; die Anfänge und Enden des einen Kreises liegen auf der Antriebsseite, die des anderen auf der Erregerseite. Sie werden getrennt von der Maschine weggeführt und außerhalb des Maschinenraumes parallel geschaltet.

Wegen der kleineren Stirnstreuung und der besseren Abstützungsmöglichkeit ist die Wicklung als Einstabwicklung ausgeführt, die in 54 halbgeschlossenen Nuten untergebracht ist. Die Isolation der Stäbe besteht aus hochwertigem Asphaltmikafolium, das auch über lange Perioden unter schwierigen Betriebsbedingungen seine Elastizität bewahrt; für die Isolation der Bügel wurde ein gleichwertiges Asphalt-Lackleinen-Band verwendet. Es ist selbstverständlich, daß angesichts der hohen mechanischen Beanspruchungen, denen die Wicklung regelmäßig ausgesetzt ist, ihre Festlegung in den Nuten und im Stirnraum ausschließlich durch volumenbeständiges Material erfolgte.

Die Beherrschung der auftretenden mechanischen Kräfte, die letzten Endes die Grundlage für eine erfolgreiche Konstruktion des Kurzschlußgenerators bildet, mußte naturgemäß der Gegenstand sorgfältiger Berechnungen sein. Abgesehen von den Beanspruchungen, die durch die Übertragung des Drehmomentes bei symmetrischem und unsymmetrischem Kurzschluß vom Blechpaket auf das Gehäuse und von dort auf das Fundament auftreten, wurden besonders eingehende Untersuchungen über die Richtung und Größe der Beanspruchungen durch die Kurzschlußkräfte im Stirnraum vorgenommen. Bekanntlich treten hier radiale Kräfte der Bügel einer Ebene gegeneinander, weiterhin axiale Kräfte der beiden Wickelkopfebenen gegeneinander und gegenüber dem Preßdeckel in verschiedenen Richtungen auf, wozu noch tangentiale Kräfte der freien Stabenden kommen. Alle diese Kräfte und die sich daraus ergebenden Beanspruchungen wurden an-

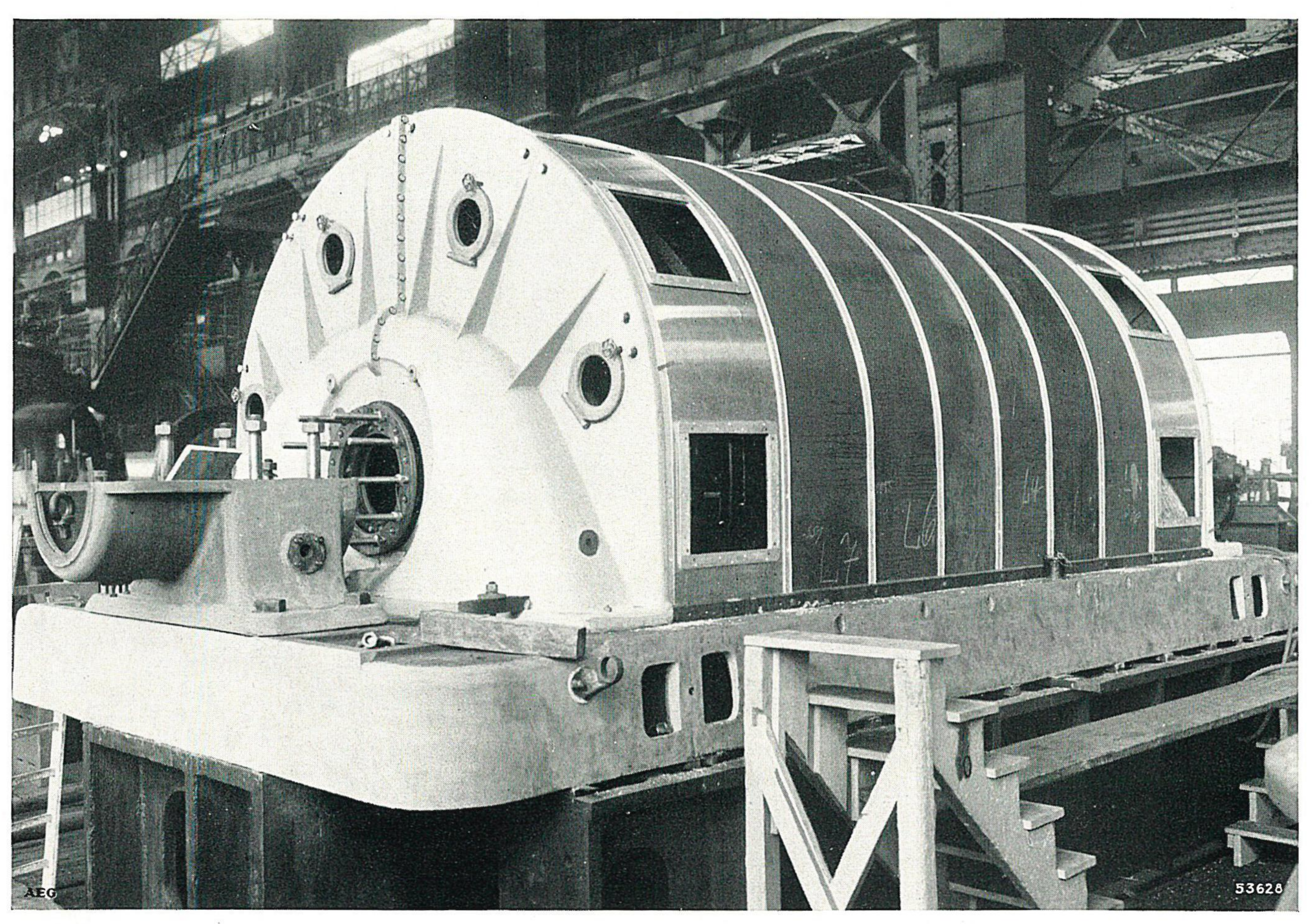


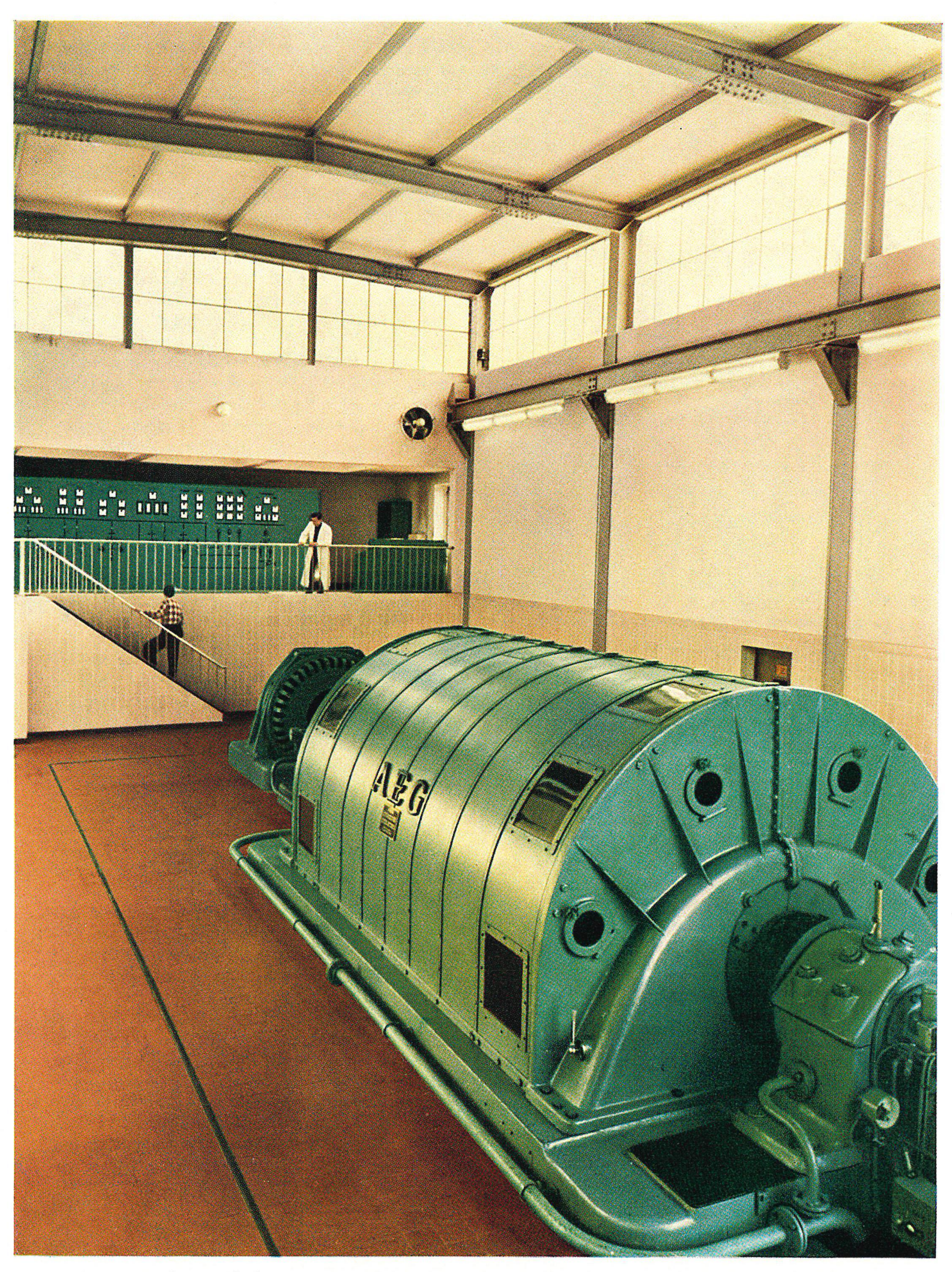
Bild 4. Ständer des Kurzschlußgenerators beim Zusammenbau in der Werkstatt

genähert ermittelt und der Ausbildung der Wicklungsversteifung zugrunde gelegt (Bild 2).

Der Induktor zeigt die Merkmale der bewährten AEG-Konstruktion. Das Schmiedestück besteht aus hochwertigem Chrom-Nickel-Molybdän-Stahl, für die Kappen wurde austenitischer Manganstahl verwendet. Erreger- und Dämpferwicklung sind in 28 gefrästen Nuten untergebracht. Dabei konnte aus den erwähnten Gründen auf die Anordnung von besonderen axialen Lüftungskanälen verzichtet werden, was in erwünschter Weise eine Verminderung der magnetischen Beanspruchungen zur Folge hatte. Die Erregerwicklung besteht aus einzeln eingelegten, aus hart gezogenem Kupfer bestehenden Bändern, während die Dämpferwicklung in kräftiger Form mit geschlossenem Käfig unter der Kappe ausgeführt ist. Die Verschlußkeile der Nuten sind dreiteilig, wobei der mittlere Teil zur Verstärkung der Dämpferwicklung aus leitendem Material besteht. Bild 3 zeigt den fertigen Induktor in der Werkstatt.

Für den Antrieb der beiden Vorgänger des Kurzschlußgenerators waren als Antriebsmotoren unmittelbar gekuppelte Asynchronmotoren vorgesehen, während die Erregung durch getrennt aufgestellte Erregerumformer zur Verfügung gestellt wurde. Der Entwurf eines zweipoligen Asynchronmotors für das Aggregat des Hochspannungsinstitutes in Berlin-Oberschöneweide bereitete hinsichtlich der Beherrschung der Anlauf- und Beschleunigungsleistung einige, allerdings nicht unüberwindliche Schwierigkeiten, so daß sich die Grenzen abzeichneten, in denen eine derartige Anordnung verwirklicht werden kann. Bei dem Hochspannungsinstitut in Kassel kam hinzu, daß die hohe Anlaufleistung größere Verstärkungen des Versorgungsnetzes erfordert hätte; außerdem ließen die erheblichen Aufwendungen für den Strom das beständige Anlassen mit einem Asynchronmotor unwirtschaftlich erscheinen. Bei dem dritten Kurzschlußgenerator wurde deshalb auf Vorschlag von J. Biermanns eine grundsätzlich andere, hinsichtlich der Anlage- und Betriebskosten vorteilhaftere Anordnung gewählt. Der Antrieb erfolgt durch eine Gleichstrommaschine, die bei Speisung über Gleichrichter gleichzeitig als Antriebsmotor und als Erregermaschine dient.

Die Anlage erhält damit die folgende Anordnung: Der Kurzschlußgenerator wird über eine magnetische Kupplung, ein Zusatzschwungrad von etwa 1 tm^2 und ein Zahnradgetriebe mit einer Übersetzung 1 : 3 mit der Gleichstrommaschine gekuppelt, deren Leistung 1000 kW bei n = 1000 U/min beträgt. Für die Speisung der Gleichstrommaschine sind zwei Gleichrichter von je 750 A vorgesehen; das Feld des Antriebsmotors wird durch einen kleinen, aus Haupt- und Hilfserregermaschine bestehenden Erregerumformer versorgt. Das Zusatzschwungrad, das aus Gründen der Gewichtsersparnis auf der schneller laufenden Seite des Getriebes untergebracht ist, dient



Gesamtansicht des Kurzschlußgenerators des Hochspannungs-Institutes. Seine Kurzschluß-Ausschaltleistung von 2000 MVA = 2 000 000 000 VA wird von keiner anderen Maschine in der Welt erreicht

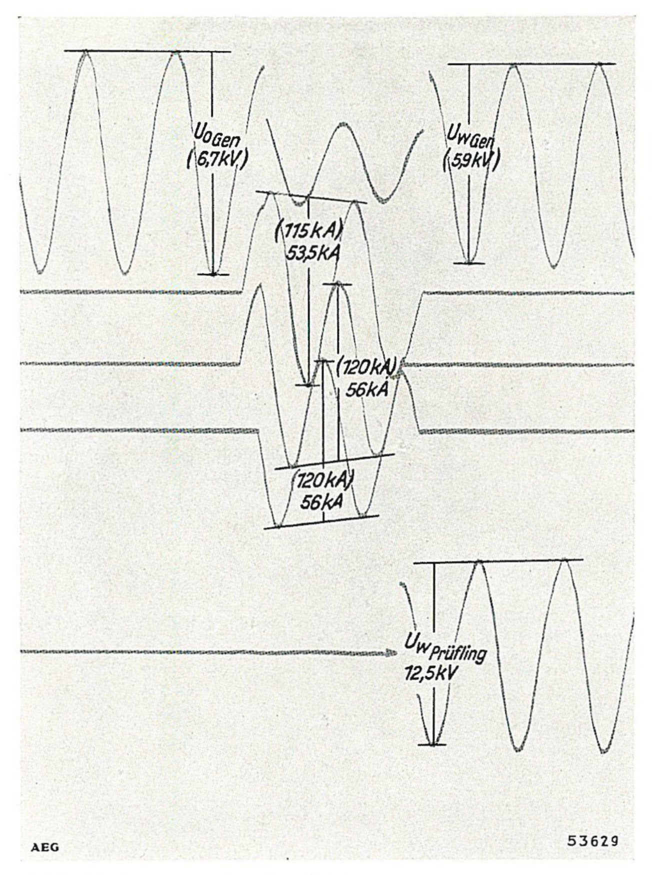


Bild 5. Oszillogramm eines Kurzschlußvorgangs bei einer Stoßerregung auf 6,9 kV
Die eingeklammerten Werte gelten für die Maschine, die nichteingeklammerten für Maschine plus Transformator

dazu, den Drehzahlabfall der Gleichstrommaschine zwischen Ein- und Ausschalten während der Prüfung möglichst klein zu halten.

Im normalen Betrieb arbeitet die Anlage wie folgt: Zum Anfahren wird die Gleichstrommaschine mit gekuppeltem Stoßgenerator durch die Gittersteuerung der Gleichrichter bis zur höchsten Drehzahl von 3150 U/min hochgefahren. Die Gleichrichterspannung beträgt hierbei etwa 660 V. Die Erregung des Kurzschlußgenerators erfolgt durch Anlegen der Induktorwicklung an die mit dem Gleichrichter parallel geschaltete Gleichstrommaschine, deren Spannung hierbei 620 V beträgt. Maschine und Gleichrichter haben in dieser Schaltung den vollen für die Stoßerregung benötigten Erregerstrom zu liefern. Nach Auferregung des Stoßgenerators wird die magnetische Kupplung gelöst, der Gleichrichter gesperrt und der Kurzschluß eingeleitet. Während des Kurzschlußversuches muß die Gleichstrommaschine den vollen Stoßerregerstrom aufrecht erhalten, wobei das oben genannte Zusatzschwungrad einen größeren Drehzahlabfall verhindert. Dabei ist zu beachten, daß der Ausgleich der magnetischen Energie im Kurzschlußgenerator, soweit er nicht von der Dämpferwicklung aufgenommen wird, zu einer weiteren Erhöhung des Induktorstromes führt, der seinen Weg über Kommutator und Bürsten der Gleichstrommaschine nimmt.

Das Aberregen erfolgt durch Gegenerregen des Induktors. Zu diesem Zweck ist die Erregerwicklung der Gleichstrommaschine mit zwei Zweigen ausgeführt, von denen der eine mit großem Vorwiderstand dem anderen, feldaufbauenden, gegengeschaltet wird. Bei der Aberregung wird der Auferregungszweig unterbrochen, wobei der Aberregungszweig noch 25% der Nennspannung erzeugt.

Die Anlage erhielt eine Reihe von für den Betrieb unerläßlichen Meß- und Regeleinrichtungen, von denen die wichtigsten hier kurz aufgeführt werden sollen. Da für die Prüfung von Leistungsschaltern nur der Höchstwert des Wechselstromgliedes interessiert, ist auf der Welle eine Synchronschaltvorrichtung vorgesehen, die den Kurzschluß in dem Augenblick einleitet, in dem das Gleichstromglied vollständig unterdrückt wird. Auf der Seite des Kurzschlußgenerators ist ein Tachometerdynamo angebracht, der über einen Regler auf die Gittersteuerung der Gleichrichter einwirkt und die höchste Betriebsdrehzahl auf 3150 U/min begrenzt. Die gleiche Anordnung ist auf der Seite der Gleichstrommaschine vorgesehen, um einen Drehzahlvergleich auch bei gelöster Kupplung zu ermöglichen. Dies ist wichtig, wenn bei noch auslaufendem Kurzschlußgenerator wieder hochgefahren werden soll. Auf beiden Seiten sind Sicherheitsregler nach Art der Schnellschlußregler bei Turbinen angeordnet, um bei einem unvorhergesehenen Überschreiten der Drehzahl von 3250 U/min die gesamte Anlage sofort stillzusetzen. Der Stoßgenerator hat auch eine Entregungseinrichtung, die bei einem Erdschluß während des Erregungsvorganges eingreifen und die Maschine vor weiteren Zerstörungen sichern kann. Für die Ölversorgung dient eine am Generator angebaute sowie eine elektrisch angetriebene Hilfsölpumpe mit selbsttätiger elektrischer Anfahrvorrichtung. Endlich ist noch eine mit Druckluft betriebene Hilfsölpumpe vorhanden.

Infolge des außerordentlich hohen Drehmomentstoßes von maximal 1000 mt sind die Abmessungen des Fundamentes sehr beträchtlich und die Verankerung mit dem Generator kräftig ausgeführt. Auf die Anordnung einer federnden Auflage zwischen Fundament und Generator, wie man sie in ähnlichen Anlagen im Auslande vorgesehen hatte, wurde nach eingehenden Untersuchungen verzichtet. Die Betriebserfahrungen mit der Maschine haben diesen Überlegungen in vollem Umfange recht gegeben. Der Einbau von Luftrückkühlern im Fundament, für die ein entsprechender Platz vorgesehen war, konnte zunächst entfallen, da die Erwärmung der Generatorluft während der Versuche sich in den Grenzen hielt, innerhalb derer sie unmittelbar in den Maschinenraum abgegeben werden kann (Bild 4).

Die sorgfältig durchgeführte Durcharbeitung des Entwurfes für den Kurzschlußgenerator sowie die weitgehende Planung der Anordnung des gesamten Aggregates verhinderte es, daß sich während des Baues die Notwendigkeit zu irgendwelchen Änderungen ergab. Die Anlage konnte deshalb trotz mancher um diese Zeit zwangsläufig noch vorhandener Schwierigkeiten in der Fertigung annähernd frist-

gemäß dem Hochleistungs-Versuchsfeld übergeben werden. Die Prüfung des Kurzschlußgenerators sowie die im Anschluß daran vorgenommenen Kurzschlußversuche mit Hochspannungsschaltern bis zur Grenze der Leistungsfähigkeit der Maschine bestätigten die in den Entwurf gesetzten Erwartungen in vollem Umfange. Die eingangs geschilderten Maßnahmen zur Erhöhung des Kurzschlußstromes, die der genauen Durchrechnung nur beschränkt zugänglich sind, ließen das gesteckte Ziel nicht nur erreichen, sondern in einer zunächst nicht vorauszusehenden Weise überschreiten. Unter Berücksichtigung der Umstände, daß die Lage der Leerlaufkennlinie sowie die Reichlichkeit des ganzen Erregersystems eine Ausdehnung der Stoßerregung bis auf 7,4 kV zuließen, ergab sich ein Höchstwert der von der Maschine zur Verfügung gestellten Kurzschluß-Ausschaltleistung von etwa 2000 MVA. Bild 5 zeigt das Oszillogramm eines Kurzschlußvorganges bei einer Stoßerregung von 6,9 kV bei Kurzschluß auf der Sekundärseite der Transformatoren. Wie die bisherigen Erfahrungen zeigen, konnten die hierbei auftretenden Kräfte von den Abstützungen der Wicklungen, der Verankerungen des Generators sowie dem Fundament ohne erkennbare Veränderungen aufgenommen werden. Mit diesen Ergebnissen legt die Anlage ein eindrucksvolles Zeugnis für die Leistungsfähigkeit des Elektromaschinenbaues der AEG ab.

KURZSCHLUSSVERSUCHE

Albert Dobbertin

DK 621.317.1.014.3

Hochleistungsversuche bedeuten nicht nur eine ständige, manchmal bis an die Zerreißgrenze gehende Beanspruchung der gesamten Versuchsanlage, sondern auch eine hohe Beanspruchung der Versuchsingenieure. Bei der Planung mußte man daher von vornherein die Betriebsmittel so auswählen und anordnen sowie die Sicherheitseinrichtungen in so ausreichendem Maße vorsehen, daß der Versuchsingenieur an seine verantwortungsvolle Aufgabe mit der Gewißheit herangehen kann, daß nicht nur die Versuchsanlage, sondern auch er und seine Mitarbeiter den vorzunehmenden Versuch ungefährdet überstehen. Dem Prüfling selbst kann man verständlicherweise diese Rücksichtnahme nicht immer angedeihen lassen, weil man ihn gewaltig überbeanspruchen muß. Wohin eine solche Überbeanspruchung führen kann, zeigt das Bild auf S. 47, das im alten Hochleistungs-Versuchsfeld der AEG bei der Prüfung eines Ölschalters aufgenommen wurde.

In den Hochleistungs-Prüffeldern ist es allgemein üblich gewesen, zu prüfende Objekte bis zur Zerstörung zu beanspruchen, weil dann eindeutig die Grenze ihrer Leistungsfähigkeit festgestellt war. Eine Prüfung bis zur Zerstörung ist nicht nur kostspielig und gefährlich, sie hat auch den schwerwiegenden Nachteil, daß die Ursache des Versagens nicht mehr einwandfrei zu erkennen ist. Deshalb hat man zwischen Kurzschlußgenerator und Prüfling den Sicherheitsschalter angeordnet, der nach einer ganz bestimmten, vorher festgelegten Zeit den Prüfling vom Generator trennt, ganz gleich, ob dieser den Kurzschluß selbst bewältigt hat oder nicht. Auf diese Weise werden Stehlichtbögen von unerwünschter Dauer und damit die Zerstörungen vermieden, die solche Lichtbögen hervorrufen. Als Sicherheitsschalter wird auch hier wie in den meisten anderen Hochleistungsversuchsfeldern ein Druckgasschalter verwendet.

Wir gewinnen einen schnellen Überblick über den Ablauf eines Kurzschlußversuches, wenn wir den Stromverlauf vom Generator G bis zu dem zu prüfenden Schalter i an Hand des Schaltungsschemas

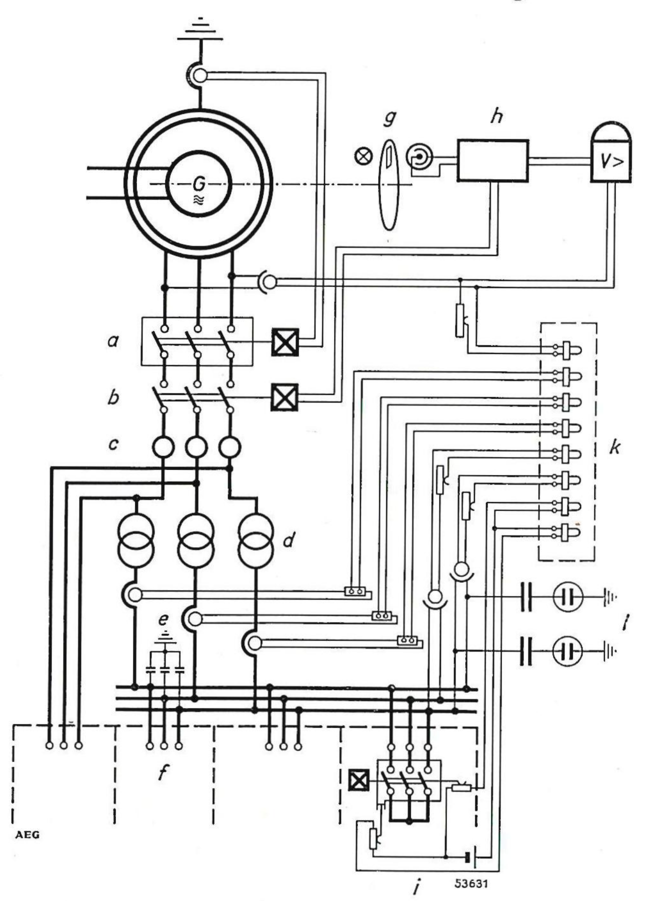


Bild 1. Schaltschema eines Kurzschlußversuchs

- a Sicherheitsschalter
- b Synchron-Draufschalter
- c Strom-Begrenzungsdrosseln
- d Einphasen-Transformatoren
- e Kondensatoren zur Abstimmung der Einschwingfrequenz der Wiederkehrspannung
- f Versuchsstände
- g Impulsgabe-Einrichtung für Synchron-Schaltung
- h Impuls-Verstärker
- i Prüfling mit angebauten Druck- und Geschwindigkeits-Meßeinrichtungen im Versuchsstand
- k Schleifen-Oszillograph
- l Elektronenstrahl-Oszillographen

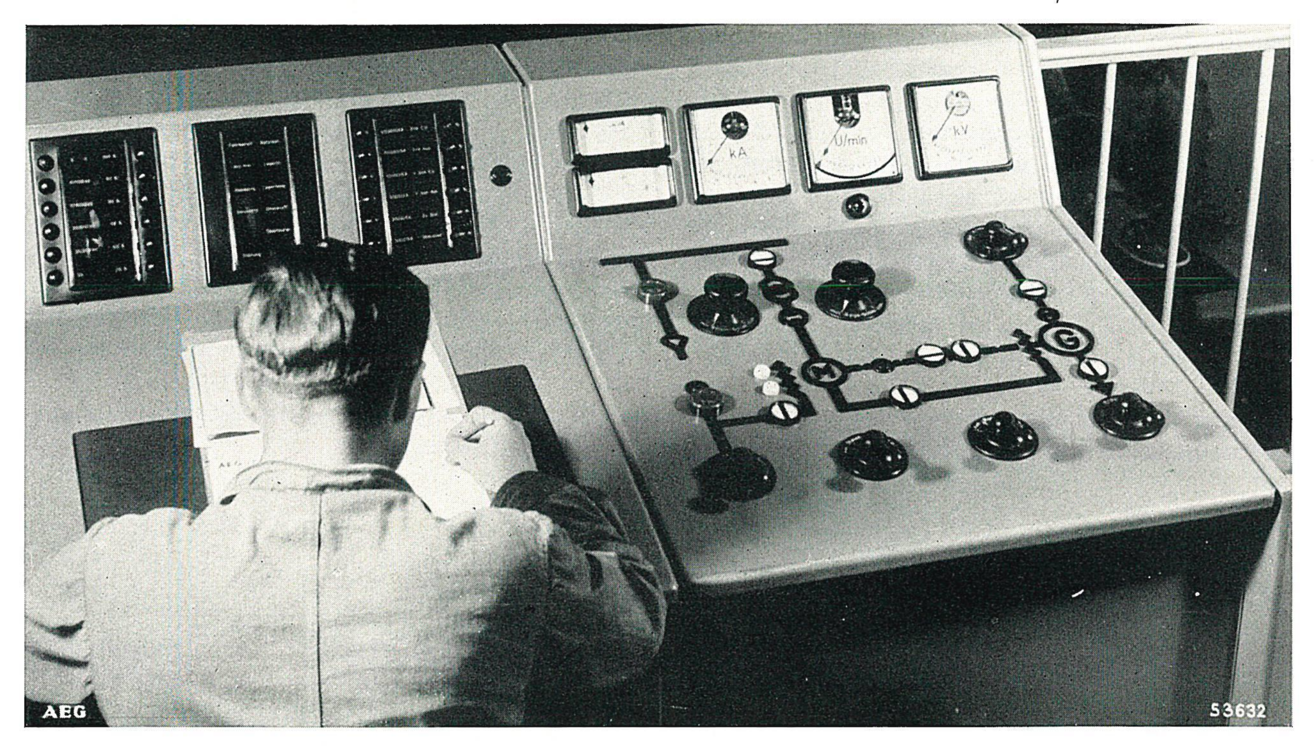


Bild 2. Steuerpult für den 2000 MVA-Kurzschlußgenerator

(Bild 1) verfolgen. Um Mißverständnisse zu vermeiden, sei bemerkt, daß die Aufteilung der Ständerwicklung des Generators in zwei von einander getrennte Wicklungssysteme und damit die sechspolige Ausführung der Verbindungsleitungen zwischen Generator und Transformatoren sowie der im Zuge dieser Leitungen liegenden Schalter und Drosselspulen im Schaltungsschema nicht berücksichtigt ist. Bei Beginn des Kurzschlußversuches sind der Sicherheitsschalter a und der zu prüfende Schalter i geschlossen, während der Draufschalter b geöffnet ist. Nachdem der Generator mit Hilfe seines Gleichstrom-Antriebsmotors auf eine die Nenndrehzahl etwas übersteigende Drehzahl gebracht ist, wird seine Erreger-

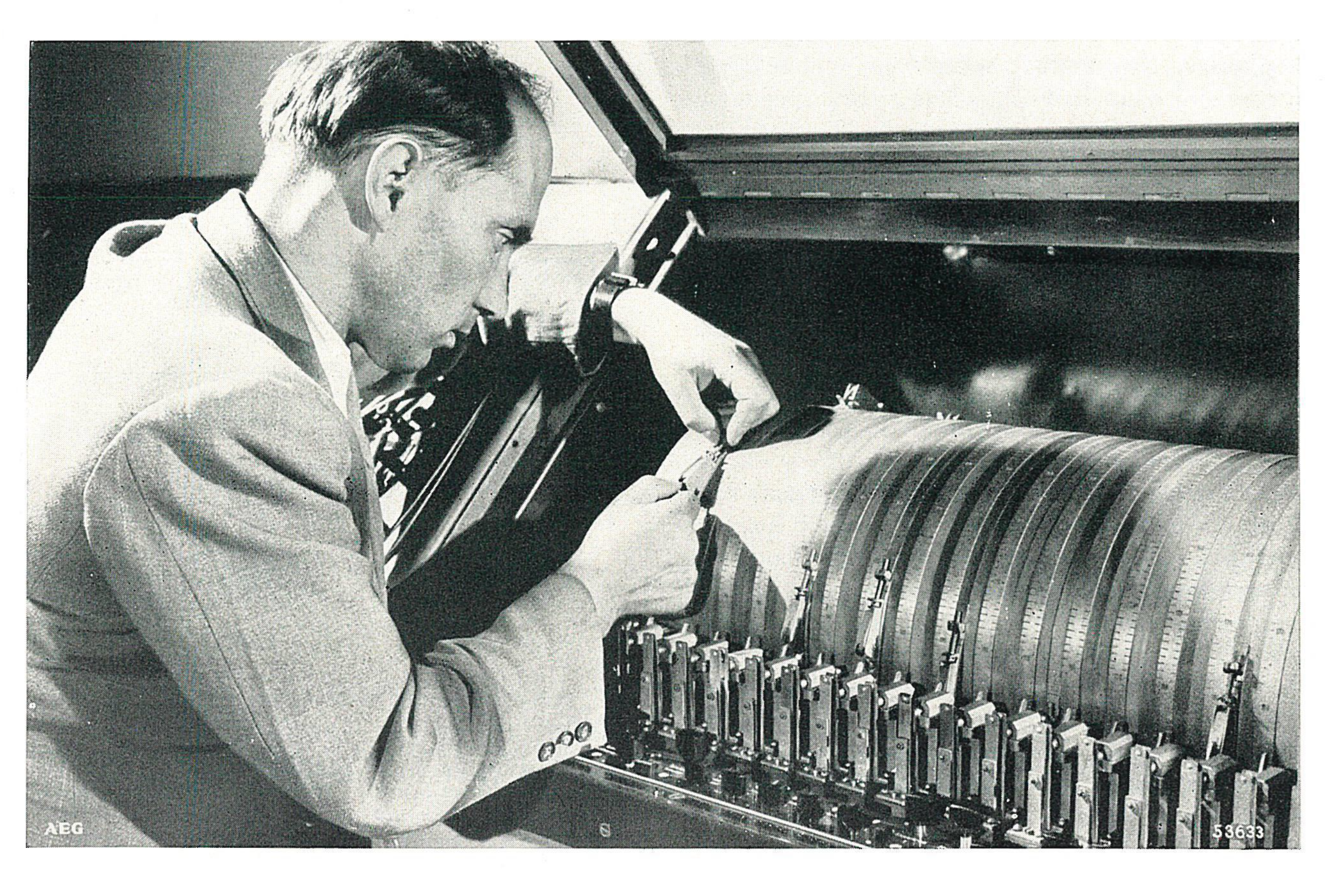


Bild 3. Meßverteiler mit Schaltwalze



Ölschalter-Explosion im alten Hochleistungsversuchsfeld der AEG

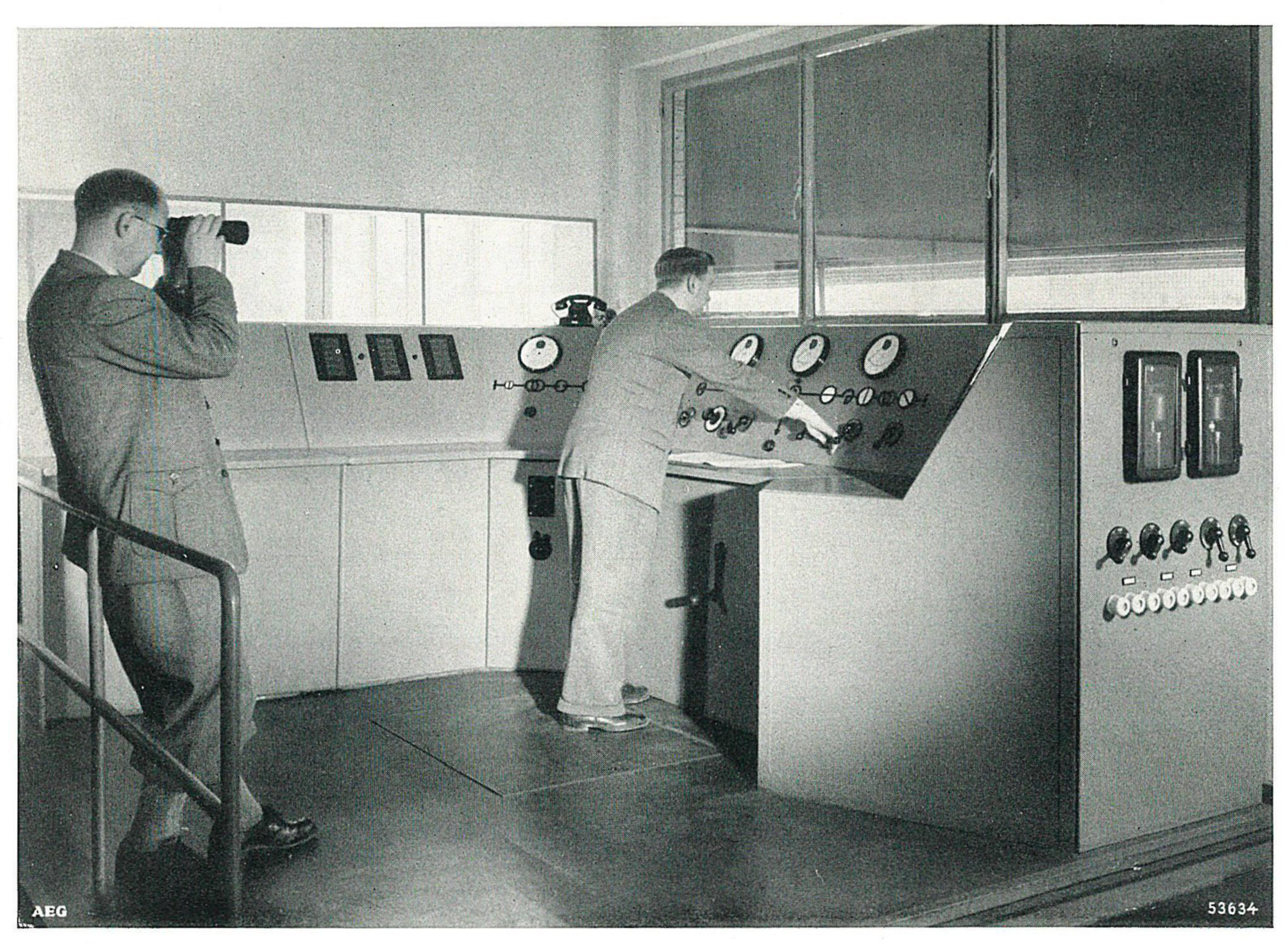


Bild 4. Beobachtungsstand des Kurzschluß-Versuchsfeldes

wicklung an die Klemmen des Antriebsmotors geschaltet und gleichzeitig die magnetische Kupplung zwischen dem Schwungrad der Gleichstrommaschine und dem Generator gelöst. Nun beginnt der Erregungsvorgang des Generators. Bei einer vorbestimmten Spannung, die an dafür vorgesehenen Spannungsrelais einstellbar ist, wird der Draufschalter b geschlossen. Die auf der Generatorwelle sitzende Impulsgabeeinrichtung g sorgt dafür, daß die beiden zuerst schließenden Pole den Strom im Scheitelwert der Generatorspannung einschalten, der dritte Pol erst 90 elektrische Grade später. Etwa drei bis fünf hundertstel Sekunden nach erfolgtem Stromschluß öffnet bereits der Prüfling i seine Kontakte. Er ist damit vor eine Aufgabe gestellt, deren Schwere vor Beginn des Versuches durch entsprechende Einstellung der mit vielen Anzapfungen versehenen Drosselspulen c und der vielfach umschaltbaren Kondensatoren e festgelegt worden war. Die Grobeinstellung der Größe des Kurzschlußstromes erfolgt an den umschaltbaren Transformatoren d; mit den Anzapfungen der Drosselspulen c wird seine Feineinstellung vorgenommen.

Wenn auch der Versuchsingenieur durch weitgehende Automatisierung von der Sorge um den rechtzeitigen Ablauf der einzelnen oben geschilderten Vorgänge entlastet ist, so ist es klar, daß er sich während des Versuches nicht auch noch um den Generator und seine Schutzeinrichtungen kümmern kann. Diese Sorge wird ihm von einem Maschinisten abgenommen, der die erforderlichen Anweisungen über ein Signalsystem mit Rückmeldung erhält (Bild 2).

In dem Bestreben, dem Versuchsleiter alle Wandlungsmöglichkeiten der Versuchsanlage, die im Verlauf einer Versuchsreihe zur Anwendung kommen können, dicht an seinem Standort zugänglich zu machen und somit eine rasche Versuchsfolge zu ermöglichen, fand hinter dem Steuerpult in der Mitte des Beobachtungsraumes das Meßverteilerpult mit eingebauter Schaltwalze Aufstellung (Bild 3). Das Meßverteilerpult dient zur Verteilung der von den Strom- und Spannungswandlern sowie von den Versuchsständen kommenden Meßleitungen auf die Schleifen- und Elektronenstrahl-Oszillographen.

Durch die Schaltwalze ist es möglich, den Ablauf der für den Versuch nötigen Folge der einzelnen Steuerimpulse vorher festzulegen. Auf dem Umfang des Walzenkörpers sind Nocken angebracht, die sich über Spannbänder verstellen lassen. Nach jeder Auslösung führt die Walze eine Umdrehung aus. Hierbei bedeutet jeder Teilstrich an den Zeitskalen der Walze eine hundertstel Sekunde. Die Nocken betätigen bei ihrer Bewegung kleine Kontakteinheiten, welche die Steuerimpulse zur Öffnung der Oszillographen, zur Betätigung des Synchron-Draufschalters, zur Auslösung des Versuchsschalters sowie

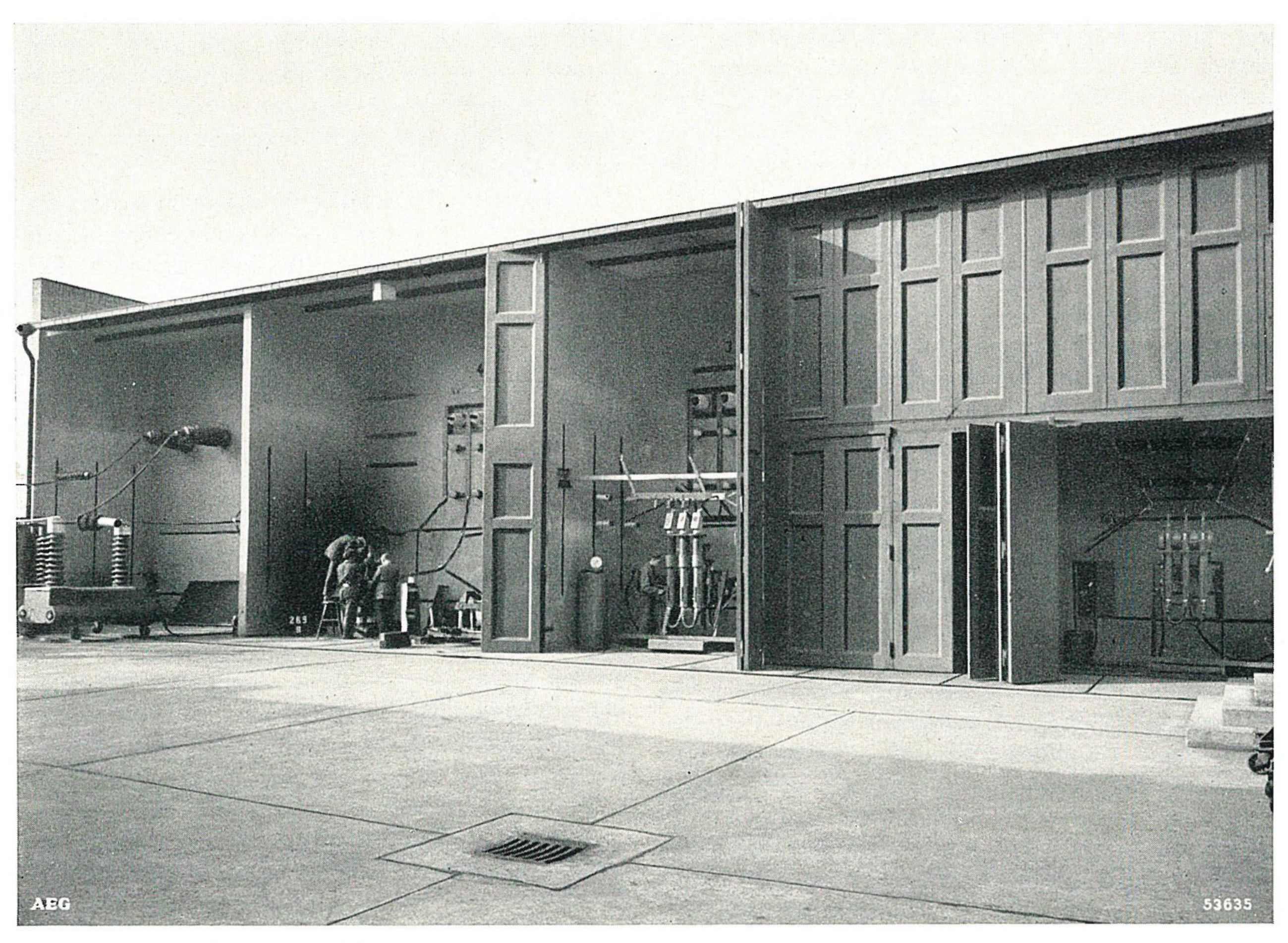


Bild 5. Versuchsstände

von Photo- und Filmgeräten weitergeben, wenn dies für die Versuchsauswertung nötig wird.
Für die Bedienung der Oszillographen steht besonderes Personal zur Verfügung, das dem Versuchsingenieur vor Beginn eines jeden Versuches die Bereitschaft meldet.
Mit diesen Mitteln ist es möglich, im einschichtigen Versuchsbetrieb bis zu drei Versuchsreihen durchzuführen, die sich außer auf die anfallenden Prüfungen der Ausschaltleistung auch auf die Ermittlung der dynamischen Festigkeit und der Dauerbelastbarkeit von Schaltgeräten und auf Lichtbogen-Untersuchungen erstrecken.
Die verschiedenen Meßvorgänge — so wichtig sie für die Beurteilung des Versuchsergebnisses auch sein mögen — spielen sich meist im Rücken des Versuchsingenieurs ab. Dieser muß seine ganze Aufmerksamkeit dem Ablauf des Versuches selbst widmen, der sich aus einer ganzen Reihe von Einzelvorgängen zusammensetzt. Er steht vor seinem Schaltpult (Bild 4), das sich den Versuchsständen (Bild 5) gegenüber befindet, die er durch ein Fenster bzw. bei herabgelassenen eisernen Schürzen durch einen schmalen Schlitz beobachten kann. Wenn er sich auch um das Anfahren und Überwachen des Kurzschlußgenerators nicht zu kümmern braucht, so bleibt ihm doch genug zu tun. So hat er durch elektrisch übertragene Signale gewisse Anweisungen, wie Einstellung einer bestimmten Drehzahl, Freischalten der ganzen Versuchsanlage usw., zu geben.
Der Versuchsingenieur muß von seinem Standpunkt aus natürlich nicht nur den Versuchsgegenstand, sondern auch die Instrumente und Betätigungsschalter seines Schaltpultes gut überblicken können. Deshalb wurde dieses auch in U-Form ausgeführt (Bild 4). Der Blick in Richtung auf die Versuchsstände zeigt unterhalb des Fensters das Feld mit den Instrumenten für die Erregung und die Spannung des Kurzschlußgenerators und im Blindschaltbild an Stellungsmeldern den Schaltzustand der Schaltgeräte, die sich von hier mit Steuerschaltern bedienen lassen. Durch Links- bzw. Rechtswendung lassen sich die beiden Felder mit der Drehzahlanzeige des Kurzschlußgenerators bzw. der Druckluftüberwachung und -regelung für den Versuchsschalter überblicken. Ein weiteres Feld gestattet die Kontrolle des Schaltzustandes der Transformatoren und Stromwandler, der auf Meldetableaus angezeigt wird, sowie die Bedienung der Weil-Schaltung. Für Hochstromversuche, die mit dem 2000 MVA-Generator über eine Hochstromtransformator durchgeführt werden, ist ein fünftes, mit Steuerorganen und Meßinstrumenten ausgerüstetes Feld angegliedert.
Die fortschreitende theoretische und experimentelle Forschung ermöglicht zunehmenden Einblick in die sich im Lichtbogen abspielenden Vorgänge und gibt

vor allem Auskunft über die Einflußgrößen, von denen das mehr oder weniger gute Arbeiten des Schalters abhängt. Daher müssen während des Versuches eine große Zahl elektrischer, mechanischer und auch optischer Größen messend verfolgt werden (Bild 7), so daß der Versuchsingenieur nach abgelaufenem Versuch, wenn die Oszillogramme und Aufnahmen entwickelt sowie diese und die sonstigen Aufzeichnungen ausgewertet sind, ein mosaikartiges Bild vom Verhalten des Prüflings erhält. So kann das Verhalten des Prüflings beurteilt werden, und der Versuchsingenieur kann die Beanspruchungen festlegen, denen der Prüfling beim nächsten Versuch zu unterwerfen ist. Im Interesse eines schnellen Versuchsablaufes und einer guten Ausnutzung der ganzen Versuchsanlage ist es erforderlich, daß die Meßergebnisse möglichst bald nach Beendigung eines jeden Versuches vorliegen. Hierfür ist kennzeichnend, daß z. B. die Oszillogramme bereits zwei Minuten nach erfolgtem Versuch fertig entwickelt und fixiert vorliegen.

Wie schon am Beginn dieser Arbeit erwähnt, ist es wichtig, den Prüfling bei Durchführung des Versuchsprogrammes möglichst schonend zu behandeln. Dies bedingt Prüfmethoden, welche die Bestimmung seiner Grenzleistung ohne seine völlige Zerstörung ermöglichen. Die Bemühungen in unserem Institut laufen daher auf eine weitere Verfeinerung der Versuchsmethoden hinaus. Wenn z. B. in einem Leistungsschalter der Unterbrechungs-Lichtbogen beim Nulldurchgang des Stromes erlischt, so folgt dem Kurzschlußstrom von vielen tausend Ampere ein nur wenige Millisekunden andauernder Nachstrom[1]) von wenigen Ampere, der beim Entionisierungsvorgang der Schaltstrecke entsteht. Gelingt es nun, diesen Nachstrom auf ein Oszillogramm zu bannen, so können aus Größe und zeitlichem Verlauf dieses Stromes Schlüsse gezogen werden, wie weit man sich beim jeweiligen Schalterversuch der Grenze der Abschaltleistung nähert. Es ist dann unter Umständen zur Beurteilung des Leistungsvermögens des Schalters nicht nötig, seine Grenzleistung zu überschreiten.

Das Verhalten eines Schalters und seine Schwächen kann man um so sicherer beurteilen, je mehr physikalische Größen zur Meinungsbildung herangezogen werden. So kann beispielsweise die Höhe des Druckes in unmittelbarer Umgebung des Unterbrechungs-Lichtbogens und seine zeitliche Zuordnung zu den Vorgängen im Schalter von großem Interesse sein. Das heißt aber, daß Einrichtungen geschaffen werden mußten, mit denen der Druck, der unter Umständen in Hochspannungsbezirken des Schalters auftritt, auf dem Oszillogramm des Unterbrechungsvorganges aufgezeichnet werden kann.

Die optischen Erscheinungen, die entweder außen oder im Inneren des Schalters unmittelbar am Lichtbogen beobachtet werden können, geben ebenfalls manchmal wichtige Hinweise. Die sich abspielenden Erscheinungen laufen häufig mit einer solchen Schnelligkeit und so unstetig ab, daß wir schon Zeitlupenaufnahmen mit 100 000 Bildern je Sekunde machen mußten.

Bei der Beurteilung des Versuchsablaufes spielen manchmal auch akustische Erscheinungen eine Rolle, so daß die zur Verwendung kommenden Meßeinrichtungen sich auch auf diesen Bereich der Physik zu erstrecken haben.

Aber auch die Messungen und Aufzeichnungen der rein elektrischen Größen, wie Spannung und Stromstärke, gehen bei den Dimensionen, um die es sich hier häufig handelt, über das mehr Handwerksmäßige des normalen Prüffeldbetriebes bei weitem hinaus. Es erfordert z. B. besondere Vorkehrungen[2]), den in einem unter Hochspannung stehenden Leiter fließenden Strom wirklichkeitsgetreu einer Oszillographenschleife zuzuführen, wenn die Stromstärke 100 000 A beträgt und außer dem Wechselstromglied dieses Stromes noch ein Gleichstromglied vorhanden ist. Die wiederkehrende Spannung an den Schalterkontakten springt innerhalb weniger Mikrosekunden auf ihren vollen Wert und überschwingt diesen meistens noch, wobei aber nicht nur die Steilheit des Spannungsanstieges, sondern auch das Maß, um das die Spannung ihren Endwert überschwingt, im Oszillogramm festzuhalten sind. Es kann auch wichtig sein, die Schwingungen in der Lichtbogenspannung aufzunehmen, die eine sehr hohe Frequenz besitzen können. Für diese Aufzeichnungen kann nur ein Kathodenstrahloszillograph Verwendung finden, der aber den Bedingungen, die ein Hochleistungsversuchsfeld stellt, erst durch eigene Konstruktionsarbeiten angepaßt werden mußte. So sind denn an der Rückwand des Beobachtungsraumes unseres Hochleistungsversuchsfeldes beiderseits einer Dunkelkammer zwei Oszillographenräume angeordnet, in denen je zwei Achtschleifen-Oszillographen und ein Zweistrahl-Kathodenstrahloszillograph aufgestellt sind.

Schrifttum

1) A. Hochrainer: Der Nachstrom in Leistungsschaltern. ETZ 73 (1952) 19, S. 627—629, 2 B.

2) W. Krämer: Fremderregte Stromwandler als Universalwandler zum Oszillographieren von Wechselstrom mit Gleichstromgliedern. ETZ 60 (1939) 13, S. 393—395, 9 B.

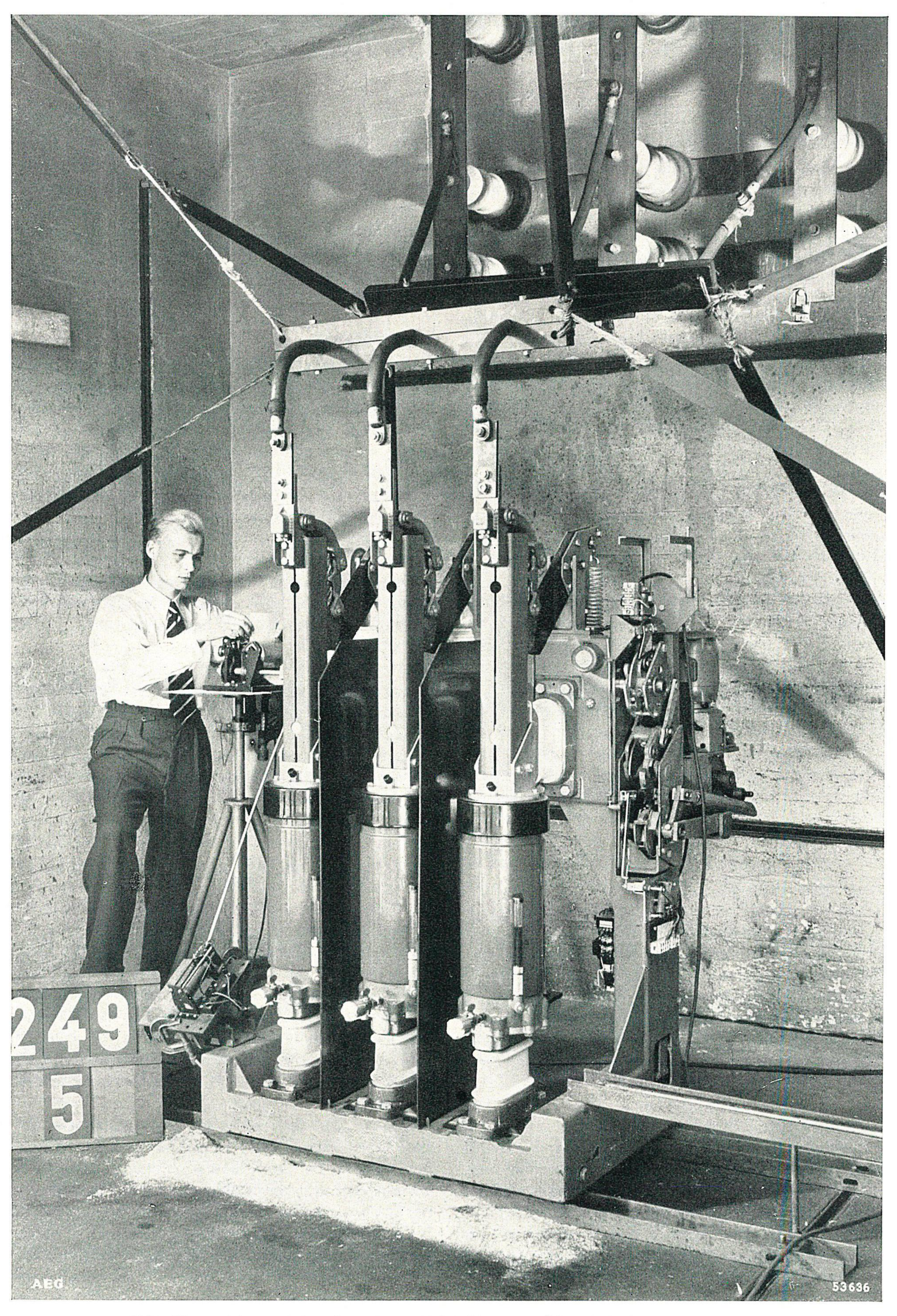


Bild 7. Ölarmer Leistungsschalter mit angebauten Meßvorrichtungen und Versuchsstand

DIE WEIL-SCHALTUNG, EINE SCHALTUNG ZUR PRÜFUNG VON HOCHLEISTUNGSSCHALTERN

Ernst Slamecka

DK 621.317.333.8.06 : 621.316.54.026.44

Schalterbeanspruchung und -prüfung

Die Beanspruchungsgrößen eines Hochleistungsschalters durchlaufen bei einer einzigen Schaltaufgabe, beispielsweise bei der den Schwerpunkt der Schalterbeanspruchung bildenden Kurzschlußausschaltung, Zahlenbereiche von vielen Größenordnungen. Kurzschlußstrom — Nachstrom, Lichtbogenspannung — Betriebsspannung, Lichtbogentemperatur — Raumtemperatur, Atmosphärendruck — Düsendruck müssen vom Schalter zweckmäßig und sicher beherrscht werden. Dazu wird es notwendig, alle Annahmen, die der Schalterberechnung zugrunde liegen, durch Vorversuche auf ihre Tragfähigkeit zu überprüfen und schließlich den neuen Schalter selbst im Großversuch auf seine Leistungsfähigkeit zu erproben.

Die geballte Kurzschlußleistung eines großen Netzes kann zur Zeit maximal etwa 8000 MVA betragen, während selbst eines der größten Schalterprüffelder der Welt mit 3200 MVA erst in weiten Abstand zu folgen vermag.

Man suchte in Ermangelung genügend leistungsfähiger Prüffelder für eine direkte Prüfung der Schalter mit der Teilprüfung der einzelnen Schaltstrecken auszukommen. Es ist jedoch bekannt, daß Extrapolationen daraus um so unsicherer sind, je kleiner die Teilleistung einer Schaltstrecke im Verhältnis zur Gesamtleistung des Schalters wird. Für Schalter größter Leistungsfähigkeit kommen auch Netzversuche nicht mehr in Frage; denn — abgesehen von der Gefährdung der Netze und der sonstigen Schwierigkeiten bei solchen Versuchen — soll die Ausschaltleistung der Schalter die Kurzschlußleistung der Netze aus Sicherheitsgründen immer übertreffen.

Eine Eigenart der Kurzschlußleistung gab seit langem schon den Anreiz, selbst größte Ausschaltleistungen mit einem verhältnismäßig bescheidenen Aufwand im Prüffeld zu realisieren. Die Ausschaltleistung eines Schalters ist keine Wirk- oder Blindleistung im üblichen Sinne, sondern eine Aufeinanderfolge von Kurzschlußstrom und wiederkehrender Spannung in zwei getrennten Zeitabschnitten. Die Schalterbeanspruchung ergibt sich durch die wiederkehrende Spannung an der noch unter der thermischen Nachwirkung des vorangegangenen Kurzschlußstromes stehenden Schaltstrecke. Daher war der Leitgedanke für eine die tatsächlichen Beanspruchungen richtig nachbildende Prüfschaltung stets: Man nehme einen Hochstrom- und einen Hochspannungskreis — einzeln lassen sich beide ohne zu großen Aufwand herstellen — und steuere ihr Zusammenwirken so, daß der Schalter trotz des vorgenommenen Ersatzes doch so beansprucht wird wie im leistungsfähigen Netz.

Die Zahl der vorgeschlagenen Ausführungsmöglichkeiten zu diesem indirekten Prüfverfahren ist zwar groß, trotzdem ist das Ziel bei den früheren Schaltungen nicht erreicht worden. Nur die wichtigsten davon sollen angeführt, und daran anschließend eine neuentwickelte Prüfschaltung beschrieben werden, die erstmalig eine wirklichkeitsgetreue Schalterbeanspruchung mit Ausschaltleistungen, die noch weit über den heute vorkommenden Kurzschlußleistungen der Netze liegen, bewirkt.

Prüfschaltungen

Im Bild 1 ist eine Schaltung zu sehen, mit der sich die Prüfleistung durch eine geschickte Ausnützung der bei einpoligen Versuchen frei bleibenden Transformatorphase verdoppeln läßt. Eine Mittelsonde zwischen den Kontakten eines Schalterpoles leitet zunächst einen dreiphasigen Kurzschlußstrom ein, führt nach der Löschung des Lichtbogens die zweifache verkettete Transformatorspannung an den Schalterpol und beansprucht diesen in ganz ähnlicher Weise wie bei der Abschaltung eines direkten Kurzschlusses. Zahlreiche Versuche bestätigten, daß es mit dieser 1925 von J. Biermanns[1]) angegebenen Prüfschaltung gelingt, die Kurzschlußbeanspruchung eines Schalters im Netz nachzubilden.

1936 beschrieb W. F. Skeats[2]) eine Prüfmethode, die es erlaubt, die Prüffeldleistung unter Zuhilfenahme eines besonders geschalteten Transformators etwa zu verfünffachen. Die in Bild 2 gezeigte Schaltung kann als eine Weiterentwicklung der vorher genannten Prüfschaltung aufgefaßt werden. Dabei wird es allerdings notwendig, alle Abweichungen, die sich aus der verhältnismäßig niedrigen Spannung des Hochstromkreises sowie durch die Verwendung des Skeats-Transformators gegenüber direkten Prüfungen ergeben, vorher zu ermitteln und zu versuchen, ihre Auswirkungen[3]) zu kompensieren, wenn die Schalterbeanspruchung in beiden Fällen die gleiche sein soll.

Daß sich die Aufeinanderfolge von Strom und Spannung bei den indirekten Prüfmethoden auch noch anders verwirklichen läßt, wird aus der Schaltung Bild 3 ersichtlich. Die Prüfspannung folgt nicht mehr wie früher dem Stromnulldurchgang automatisch, sondern nach dem Nullwerden des Stromes wird die Prüfspannung in Form eines steilen Spannungsstoßes auf den Schalter gegeben. Zusätzlich zu dieser Abweichung der Spannungsbeanspruchung von den natürlichen Verhältnissen unterscheidet sich auch hier, ähnlich wie bei der Skeats-Schaltung, der Stromverlauf kurz vor dem Nulldurchgang beträchtlich von der Stromkurve, die sich bei der vollen Netzspannung als treibende Spannung ergeben würde. Es ist ferner praktisch kaum lösbar, die Steuerung so fein abzustimmen, daß die Prüfspannung zeitlich genau so wie die wiederkehrende Spannung bei direkten Versuchen einsetzt. Aus der möglichen kleinen Bean-

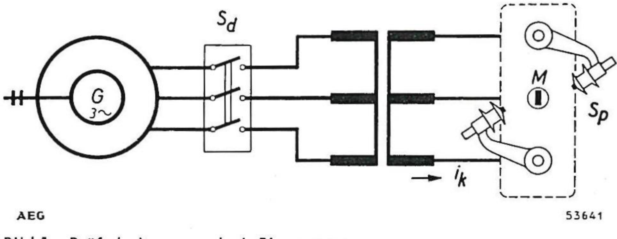


Bild 1. Prüfschaltung nach J. Biermanns
S_p Einzelner Schalterpol eines Freistrahldruckgasschalters
M Mittelsonde
S_d Draufschalter

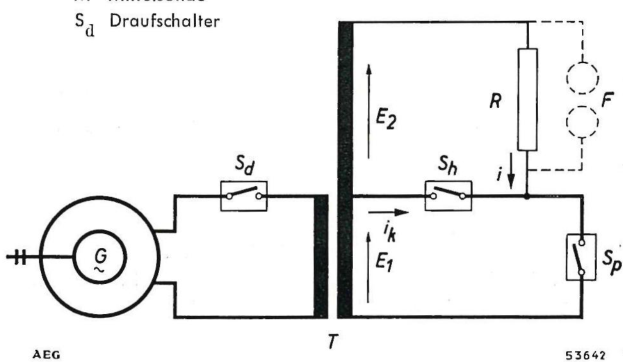


Bild 2. Prüfschaltung nach W. F. Skeats
T Transformator mit einer Hochspannungs-Zusatzwicklung
R Strombegrenzungswiderstand } alternativ
F Schaltfunkenstrecke
S_h Hilfsschalter
S_p Prüfling

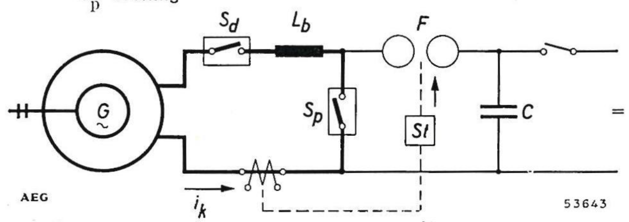


Bild 3. Schalterprüfung mit Stoßspannung
S_p Prüfling
F Schaltfunkenstrecke
St Steuergerät
C Kondensator
L_b Strombegrenzungsdrossel

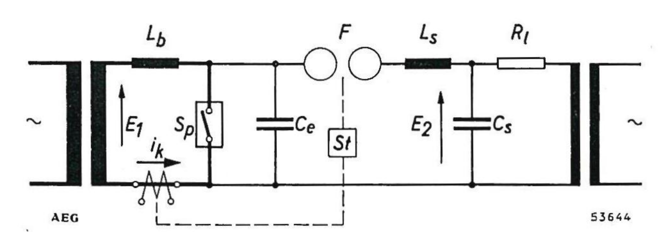


Bild 4. Prüfschaltung mit oszillierender Prüfspannung
S_p Prüfling
C_e, C_s, L_s Schaltelemente des Hochspannungs-Schwingkreises
F Schaltfunkenstrecke
St Steuergerät
E_1 Verhältnismäßig geringe, den Kurzschlußstrom i_k treibende Spannung
E_2 Kondensatorspannung in der Größenordnung der Prüfspannung

spruchungspause zwischen dem Stromnulldurchgang und dem Zuschalten der Prüfspannung können sich ungewollte und unbestimmte Einflüsse auf das Prüfergebnis geltend machen.

Eine bessere Form der Spannungsbeanspruchung ermöglicht die Schaltung nach Bild 4. Hier wird nach dem Nulldurchgang des Stromes ein Hochspannungs-Schwingkreis über eine Funkenstrecke an den zu prüfenden Schalter gelegt, und die Spannung schwingt an der Schaltstrecke mit entsprechender Frequenz und Amplitude ein. Hinsichtlich des Kurzschluß-Stromverlaufes im Nulldurchgang und des Einsatzes der Prüfspannung bleiben die eben erwähnten Mängel bestehen.

Die Weil-Schaltung und ihre Ausführung im Hochspannungs-Institut

1942 hat F. Weil, ein Mitarbeiter des Hochleistungs-Versuchsfeldes der AEG, eine Schaltung vorgeschlagen, die von den Mängeln der bis dahin bekannten Anordnungen frei ist. Das Wesentliche an der Weil-Schaltung Bild 5 ist die richtige Steuerung des Hochspannungskreises. Alle bisher bekannten, gesteuerten Prüfschaltungen standen vor dem Problem, den Hochspannungskreis gerade im richtigen, an Mikrosekunden gebundenen Augenblick an die Klemmen des löschenden Schalters zuzuschalten. Trotz aller Bemühungen konnte hierfür keine befriedigende Lösung gefunden werden. F. Weil erreicht die wirklichkeitsgetreue Nachbildung der Schalterbeanspruchung, indem er den Hochspannungskreis verhältnismäßig lange vor dem Nulldurchgang des Kurzschlußstromes, in einem noch wenig kritischen Zeitbereich über den zu prüfenden Schalter schließt. Die in diesem stattfindende Stromüberlagerung führt dann bei richtiger Auslegung des Hochspannungs-Schwingkreises ohne jeden weiteren Steuerungseinfluß zu einer echten Beanspruchung und Prüfung des Schalters. Im einzelnen arbeitet die Schaltung folgendermaßen:

Der Hochstromkreis, in dem sich die gebräuchlichen, einstellbaren Strombegrenzungs-Induktivitäten befinden, wird von einem Synchrongenerator, dessen Klemmenspannung nur groß im Verhältnis zur Lichtbogenspannung der beiden Schalter zu sein braucht, gespeist und über einen sogenannten Draufschalter geschlossen. Auf der anderen Seite steht ein aufgeladener Kondensator bereit, um von der Steuerung über eine Funkenstrecke und eine Schwingdrossel an die Klemmen des zu prüfenden Schalters angeschlossen zu werden. Sobald der Draufschalter im Scheitelwert der Generatorspannung den Hochstromkreis geschlossen hat, schalten Hilfs- und Prüfschalter diesen Kurzschluß gleichzeitig ab, und die Funkenstrecke wird ungefähr 15 el. Grade vor dem Nulldurchgang des Kurzschlußstromes von der Steuerung gezündet. Es ergibt sich damit ein Verlauf der Ströme und Spannungen, wie ihn Bild 6 zeigt.

In dem Strombild bemerkt man, daß der Strom im Prüfschalter ohne nennenswerte Verzerrung mit der normalen Steilheit seiner Sinusform dem Nullwert zustrebt. Dabei ist aber der Strom des Hochstromkreises schon vorher zu Null geworden, und der Schwingkreis hat zuletzt die Stromlieferung ganz übernommen. Der Strom im Schwingkreis ist unverzerrt, da im Gegensatz zum Hochstromkreis hinter ihm die volle treibende Spannung steht. Sobald der resultierende Strom an der Schaltstrecke des Prüflings zu Null ge-

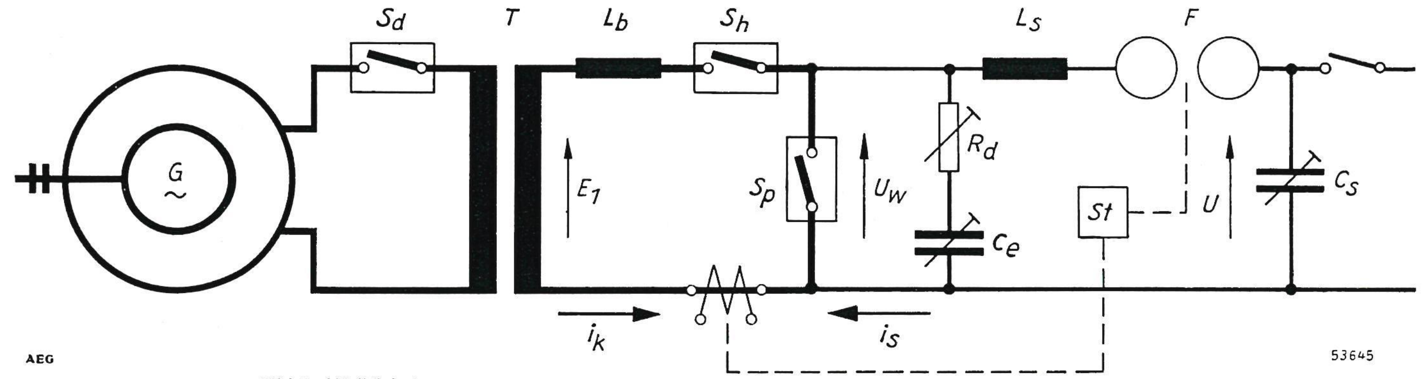


Bild 5. Weil-Schaltung

G Generator
S_h Hilfsschalter
S_p Prüfling
S_d Draufschalter
L_b Strombegrenzungsdrossel

C_s, L_s, R_d, C_e Einstellbare Schaltelemente des Hochspannungs-Schwingkreises
F Schaltfunkenstrecke
St Steuergerät

E_1 Spannung des Hochstromkreises
U Scheitelwert der Kondensatorspannung vor dem Einsetzen der Steuerung

Bereits vor dem Nulldurchgang des Kurzschlußstromes i_k wird der Hochspannungs-Schwingkreis durch die Steuerung über die Funkenstrecke geschlossen. Von diesem Zeitpunkt an überlagert sich dem Kurzschlußstrom der Schwingstrom i_s. Die wiederkehrende Spannung folgt unmittelbar der Lichtbogenlöschung und kann in ihrem Verlauf den Gegebenheiten des Netzes genau angepaßt werden.

worden ist, tritt an ihr sofort selbsttätig die treibende Spannung genau so wie im Netz auf. Die durchgeführte Überlagerung des Schwingstromes hat gleichzeitig bewirkt, daß der Strom im Hilfsschalter vorzeitig erlischt und den Hochstromkreis vom Schwingkreis trennt. In der Tatsache, daß Strom und Spannung beim Nulldurchgang des Stromes von ein und demselben Stromkreis geliefert werden, ist der

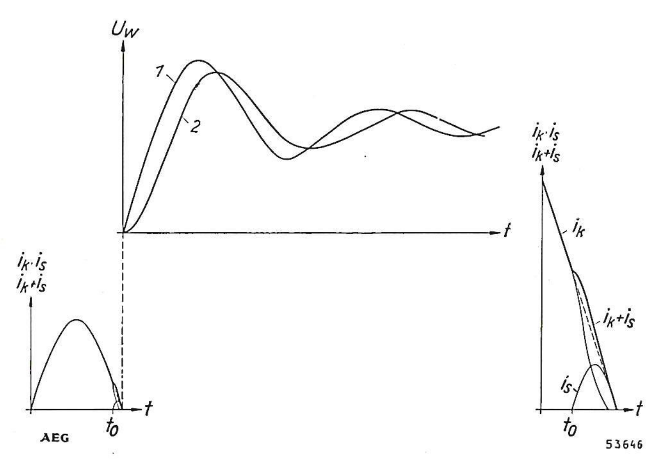


Bild 6. Strom- und Spannungsverlauf bei der Schalterprüfung mit der Weil-Schaltung

i_s Strom im Hochspannungs-Schwingkreis = Schwingstrom
i_k Kurzschlußstrom
u_w Wiederkehrende Spannung an der Schaltstrecke des zu prüfenden Schalters
Kurve 1: $R_d \neq 0$
Kurve 2: $R_d = 0$
links: Gesamtverlauf der Ströme und Spannungen
rechts: Detail der Stromüberlagerung im Prüfschalter

entscheidende Fortschritt zu erblicken, der mit der Entwicklung der Weil-Schaltung erreicht wurde.

Diesen Stromverlauf verfolgen wir an Hand des entsprechenden Schaltbildes (Bild 7). Bis zur Löschung des Schaltlichtbogens gilt das Schaltbild 7a. In seinem Kreis fließt eine Schwingstrom-Halbwelle vom Einsetzen der Steuerung (t_0) bis zur endgültigen Lichtbogenlöschung (t_1). Im Zeitpunkt t_1 findet dann der Übergang zu dem Schaltbild 7b statt, und der in dem neuen Kreis fließende Ladestrom der Einschwingkondensatoren klingt mit der Frequenz der wiederkehrenden Spannung gedämpft aus. Man wählt den Schwingstrom zwar klein gegen den Kurzschlußstrom, aber doch von einer

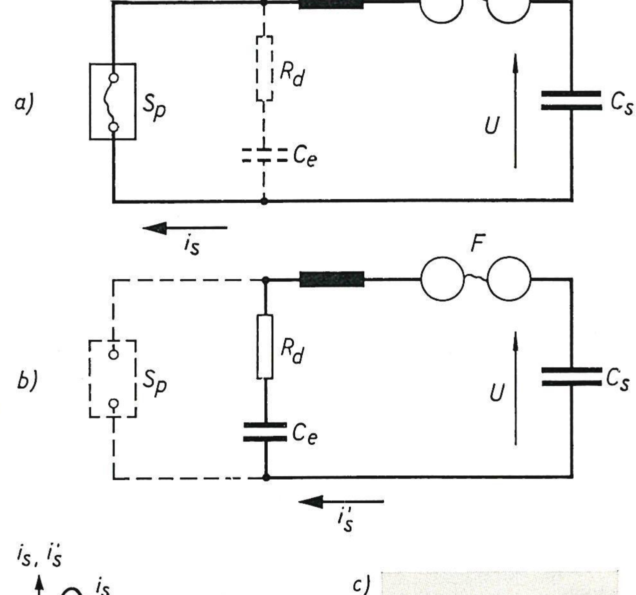


Bild 7. Stromverlauf im Hochspannungs-Schwingkreis der Weil-Schaltung (siehe auch Bild 5, 6)

i_s Schwingstrom
i'_s Kondensatorenladestrom

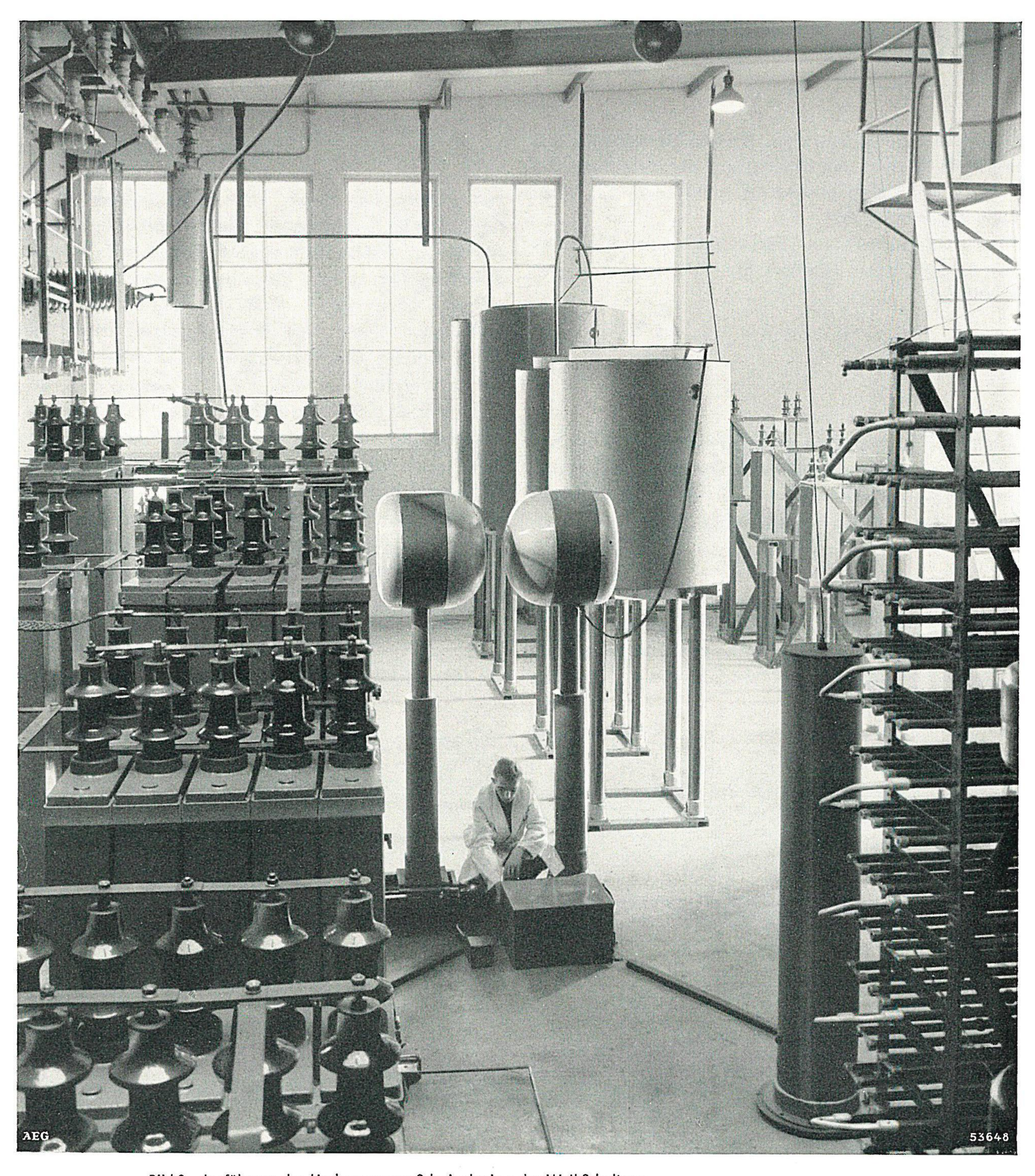


Bild 8. Ausführung des Hochspannungs-Schwingkreises der Weil-Schaltung
vorn links: Kondensator C_s; Mitte: Funkenstrecke F; dahinter: Drosselspulen L_s; hinten rechts: Kondensator C_e
vorn rechts: Ladegleichrichter für C_s (Selen-Hochspannungs-Gleichrichter)

solchen Größe, daß er die Abweichung des Hochstromlichtbogens von der Sinuslinie kompensiert und daß seine Neigung im Nulldurchgang mit der des Netz-Kurzschlußstromes bei Nennspannung übereinstimmt. Die wiederkehrende Spannung folgt unmittelbar auf den Strom, und sie kann in ihrem Verlauf den Gegebenheiten des Netzes genau angepaßt werden. Auf diese Weise können Ausschaltleistungen bis zum Zehn- und Mehrfachen der Kurzschlußleistung des Prüfgenerators verwirklicht werden, wobei der zu prüfende Schalter genau so wie bei einem Netzversuch beansprucht wird.

Wir wollen jene Vorgänge auch noch in einigen Formeln darstellen. Die Forderung lautet, daß der Schwingstrom i_s mit dem idealen Kurzschlußstrom i_k, der keine durch die Lichtbogenlöschung bedingte Verzerrung aufweist, im Nulldurchgang die gleiche Neigung

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{di_k}{dt} \qquad (1)$$

habe. Dies kann leicht erfüllt werden, und bei Ver-

nachlässigung des ohmschen Widerstandes erhält man nach der Formel

$$\frac{di_k}{dt} = \frac{U}{L_s} \quad (2)$$

Dimensionierungsunterlagen für den Hochspannungs-Prüfkreis. U stellt den Scheitelwert der Spannung des aufgeladenen Kondensators C_s und L_s die Schwingkreis-Induktivität dar.

Für die wiederkehrende Spannung an den Klemmen des zu prüfenden Schalters gilt näherungsweise der Ausdruck

$$U_w = U\alpha \left[(1 - e^{-\delta t} \cos \gamma t) + \frac{\delta}{\gamma} (2 - \alpha) e^{-\delta t} \sin \gamma t \right] \quad (3)$$

mit

$$\delta = \frac{R}{2L_s}, \quad \gamma = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad \alpha = \frac{C_s}{C_s + C_e}.$$

Aus dem Bild 5 ergibt sich die Bedeutung der einzelnen Symbole dieser Gleichung. Die Ausschaltleistung errechnet sich dann mit der für die Prüfung eines Einzelpoles gültigen Gesetzmäßigkeit zu

$$N = 2 J_k \cdot U_N, \quad (4)$$

wenn J_k und U_N die Effektivwerte des Kurzschlußstromes und der stationären Netzspannung sind. Zur Orientierung über die Frequenz der wiederkehrenden Spannung genügt eine einfache Gleichung, die wegen der geringen Dämpfung des Hochspannungs-Schwingkreises ohne weiteres zulässig ist,

$$f_w = \frac{1}{\sqrt{\frac{C_s C_e}{C_s + C_e} \cdot L_s}}. \quad (5)$$

Nun lassen sich Strom- und Spannungsverlauf an dem Schalter konstruieren, wie dies im Bild 6 durchgeführt worden ist. Man ersieht daraus, daß die Weil-Schaltung frei ist von den beiden wesentlichen Einwänden, die gegen indirekte Prüfverfahren mit getrenntem Strom- und Spannungskreis immer gemacht wurden. Die Verzerrung der Stromkurve durch den im Vergleich zur treibenden Spannung im Stromkreis großen Lichtbogenabfall ist durch die Überlagerung des Schwingstromes ausgeglichen. Eine spannungslose Pause nach dem Stromnulldurchgang wird grundsätzlich vermieden. Auch einem weiteren Einwand hält die Weil-Schaltung stand. Der Hochspannungskreis ist so ergiebig, daß er den von der Restleitfähigkeit der Schaltstrecke geforderten Nachstrom ohne jede Verzerrung der Spannungsform liefern kann. Schließlich kann man durch passende Dimensionierung des Schwingkreises und der zusätzlichen Kapazitäten die an der Schaltstrecke auftretende einschwingende Wiederkehrspannung bezüglich Frequenz und Amplitude so einstellen, wie sie im tatsächlichen Netzbetrieb auftritt.

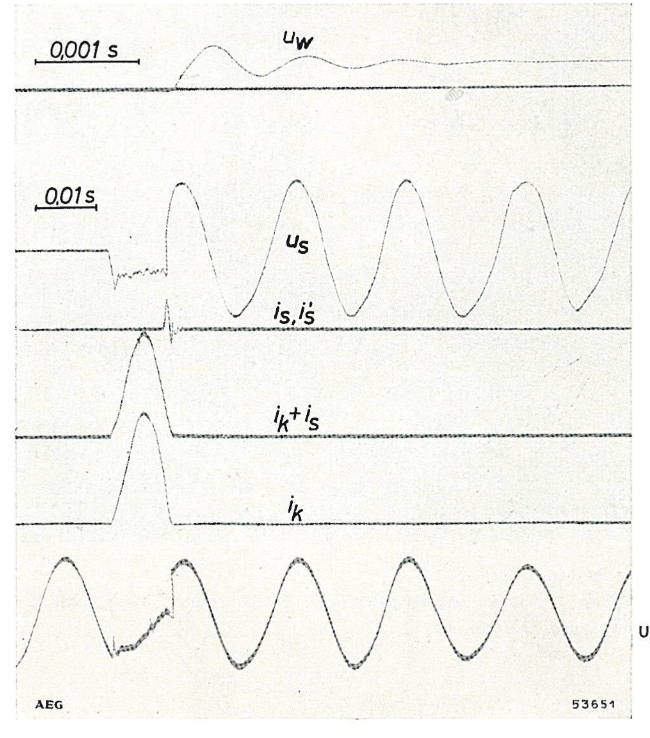


Bild 10. Oszillogramme der Ströme und Spannungen bei der Ausschaltung einer Kurzschlußleistung von 3200 MVA mit einem 110 kV-Freistrahldruckgasschalter

i_k Kurzschlußstrom
$i_k + i_s$ Resultierender Strom in der Schaltstrecke des zu prüfenden Schalters
i_s, i'_s Ströme im Hochspannungs-Schwingkreis
u_G Generatorspannung
u_s Wiederkehrende Spannung am Hilfsschalter S_h
u_w Wiederkehrende Spannung an dem zu prüfenden Schalter S_p

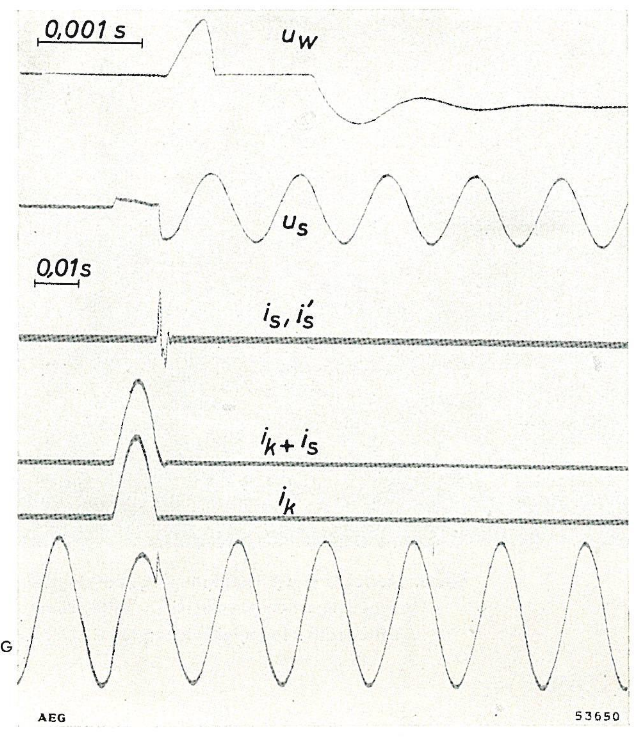


Bild 11. Oszillogramme der Ströme und Spannungen einer Ausschaltung, bei der es zu einer Wiederzündung an der zu prüfenden Schaltstrecke kam. Charakteristisch dafür ist das Zusammenbrechen der wiederkehrenden Spannung und die zweite Schwingstrom-Halbwelle. Im übrigen gelten die gleichen Bezeichnungen wie in Bild 10.

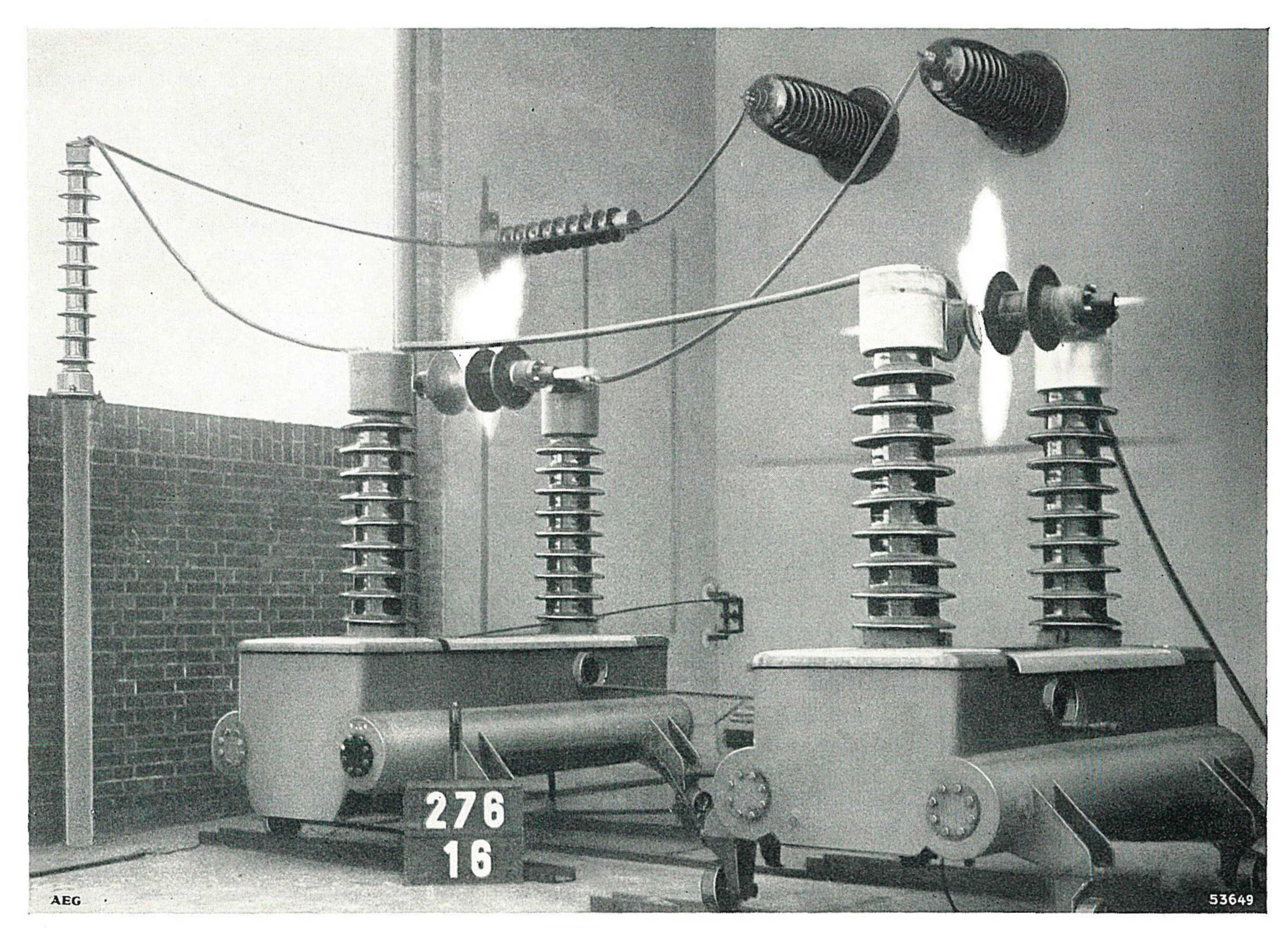


Bild 9. 110 kV-Freistrahldruckgasschalter während der Prüfung mit der Weil-Schaltung; die gerade ausgeschaltete Kurzschlußleistung beträgt 3200 MVA. Links befindet sich der Hilfsschalter, rechts der Prüfling

Der Aufbau des Hochspannungskreises im Schalthaus des Hochspannungsinstitutes ist aus Bild 8 zu erkennen. Für den Hochstromkreis werden die für die direkte Schaltleistungsprüfung im Rahmen der Leistungsfähigkeit des Prüfgenerators vorgesehenen Elemente verwendet.

Das Bild 9 zeigt einen Schalter für 110 kV bei der Prüfung mit der beschriebenen Schaltung. Es wird soeben eine Leistung von 3200 MVA ausgeschaltet. Im Bild 10 ist das dazugehörige Oszillogramm wiedergegeben. Aus dem Vergleich mit dem Diagramm im Bild 6 geht die Übereinstimmung mit dem dort dargestellten theoretischen Verlauf von Strom und Spannung hervor. Ebenso deutlich wie diese erfolgreiche Ausschaltung muß auch ein eventuelles Versagen der zu prüfenden Schaltstrecke in den Oszillogrammen erkennbar sein. Charakteristisch dafür ist das plötzliche Zusammenbrechen der wiederkehrenden Spannung sowie eine zweite Schwingstrom-Halbwelle (Bild 11). Die Kurzschlußleistung übertraf in diesem Fall die Grenzausschaltleistung des Schalters bei weitem.

Daß dem so ist, kommt in der gegenüber dem Schwingstrom-Oszillogramm im Bild 10 bedeutend vergrößerten Schwingstrom-Halbwelle zum Ausdruck, wogegen Kurzschlußstrom und wiederkehrende Spannung wegen der geänderten Übersetzungsverhältnisse nicht unmittelbar vergleichbar sind.

Schrifttum

1) J. Biermanns: Hochspannung und Hochleistung, Carl Hanser-Verlag, München, 1949.

2) W. F. Skeats: Special tests on impuls circuit breakers, Electr. Engng., 55 (1936) 6, S. 710—717, 14 B, 2 Qu.

3) E. Maury et J. Renaud: Méthode d'essais synthétiques de disjoncteurs, Rev. gén. Electr. 32 (1948) 10, S. 389—401, 22 B.

DIE STEUERUNG DER WEIL-SCHALTUNG

Franz Opitz

DK 621.317.333.8.06

Bei der Leistungsprüfung von Schaltern mit der Weil-Schaltung wird der Hochspannungskreis kurz vor dem Nulldurchgang des Kurzschlußstromes durch Zündung einer Funkenstrecke zugeschaltet. Die Auslösung dieses Vorganges erfolgt durch eine elektronische Steuerung, die eine besondere Betrachtung verdient. Die Steuerung hat drei Aufgaben zu erfüllen. Zunächst muß aus dem Kurzschlußstrom ein Impuls mit bestimmter Lage innerhalb der Periode abgeleitet werden, wobei die zeitliche Lage des Impulses einstellbar sein muß. Dieser Impuls ist dann für den Schwingkreis auf das Hochspannungspotential der Funkenstrecke zu übertragen und hat schließlich diese Funkenstrecke zu zünden.

Die erste Aufgabe wird durch die Reihenschaltung zweier Stromwandler gelöst, von denen der erste den Kurzschlußstrom in einen Meßwandlerstrom auf Erdpotential übersetzt, während der zweite diesen Strom in einen in seiner zeitlichen Lage einstellbaren Impuls verwandelt. Dieser Impuls wirkt nach einem Vorschlag von K. Blömeke auf ein Blitzgerät, welches das eine Ende der photoelektrischen Übertragung des Impulses vom Erdpotential auf das Hochspannungspotential darstellt. Das Blitzgerät steht am Fuß der Funkenstrecke des Schwingkreises, und in einer der beiden Kugeln der Funkenstrecke ist eine Photozelle eingebaut, welche den Lichtimpuls aufnimmt. In der Kugel befindet sich das Zündgerät. In ihm wird der Impuls verstärkt, so daß über einen Zündtransformator T eine Hilfs-Zündfunkenstrecke anspricht, wodurch der Überschlag an der Funkenstrecke eingeleitet wird (Bild 1 und 2).

Der Impulswandler ist ein vorgesättigter Ringwandler, der im Stromnulldurchgang eine Spannungsspitze erzeugt, die das Gitter eines Thyratrons im Blitzgerät beaufschlagt. Zusätzlich hat der Wandler eine Gleichstromwicklung zur Vormagnetisierung, mit der eine zeitliche Verschiebung des Impulses erreicht werden kann (Bild 3). Diese Verschiebung ermöglicht es, den Zündzeitpunkt der Funkenstrecke genau einzustellen und außerdem die Eigenzeit der gesamten Steuerung zu kompensieren. Da das vom Ringwandler gesteuerte Thyratron einen Zündbereich von einigen Volt hat, ist ein sehr steiler Impuls notwendig, um die Streuung des Rohres gering zu halten. Die Steilheit des Impulses ist aber vom Primärstrom, von der Vormagnetisierung und von der Belastung des Ringwandlers abhängig. Im Blitzgerät wird der Impuls verstärkt und dann mit einer Blitzröhre in den Lichtimpuls verwandelt. Dabei wird ein Kondensator über das oben erwähnte Thyratron auf eine Zündspule entladen, welche die Zündspannung für die Blitzröhre liefert.

Die Entwicklung dieses Gerätes war nicht einfach; so mußte die Leistungsfähigkeit der Röhre mit dem Energiebedarf der Zündspule so abgeglichen werden, daß bei geringer Streuung ein Maximum an Leistung erreicht wurde.

Besondere Sorgfalt mußte auch bei der Abschirmung des Gerätes angewendet werden. Dadurch, daß das Blitzgerät einerseits auf Erdpotential steht, andererseits aber dem Einfluß des elektrischen Feldes der mit einigen hundert kV geladenen Kondensatorenbatterie ausgesetzt ist, fanden statische Aufladungen der Gitter- und Steuerleitungen statt, die das Gerät ungewollt zum Ansprechen brachten. Nur durch eine einwandfreie Abschirmung aller Teile und Leitungen und durch eine Stabilisierung der verschiedenen Potentiale wurde ein sicheres Arbeiten des Gerätes erreicht.

Das Zündgerät befindet sich in einer der beiden Kugeln der Funkenstrecke und empfängt mit einer Photozelle den optischen Impuls der Blitzröhre. Der Leistungsbedarf des Zündgerätes wird durch eine Akkumulatorenbatterie gedeckt, die in ihren äußeren Abmessungen und somit in ihrer Kapazität durch die Größe der Kugel festgelegt ist. Aus diesem Grunde war man bestrebt, die Leistungsaufnahme des Gerätes kleinzuhalten, indem z. B. Röhren mit kleiner Heiz-

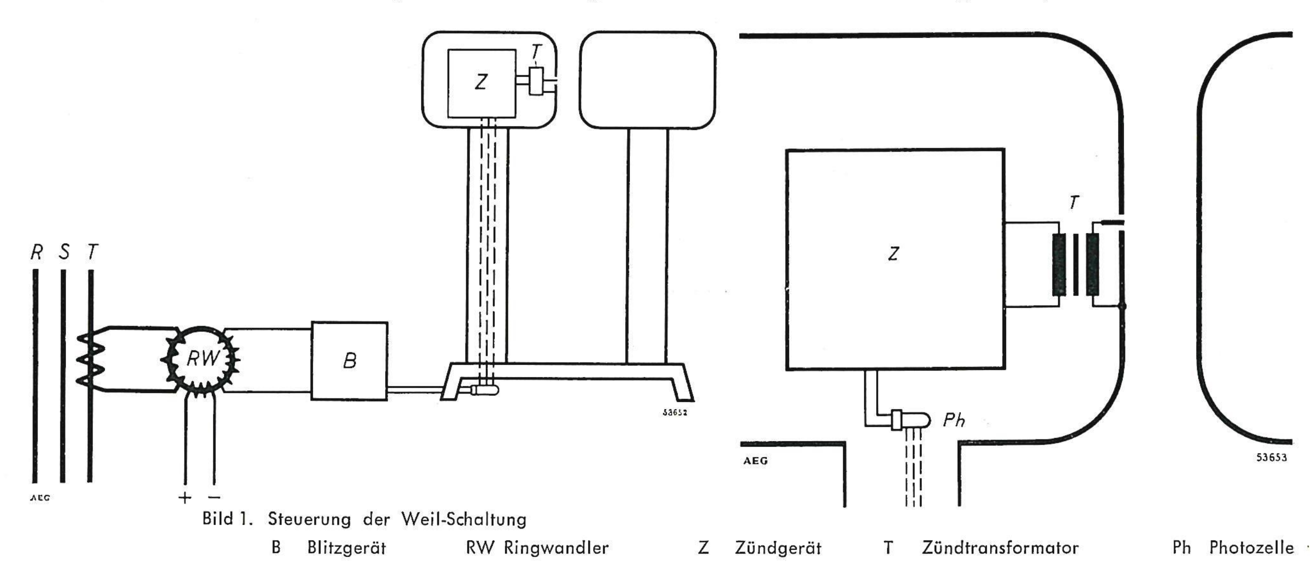


Bild 1. Steuerung der Weil-Schaltung
B Blitzgerät RW Ringwandler Z Zündgerät T Zündtransformator Ph Photozelle

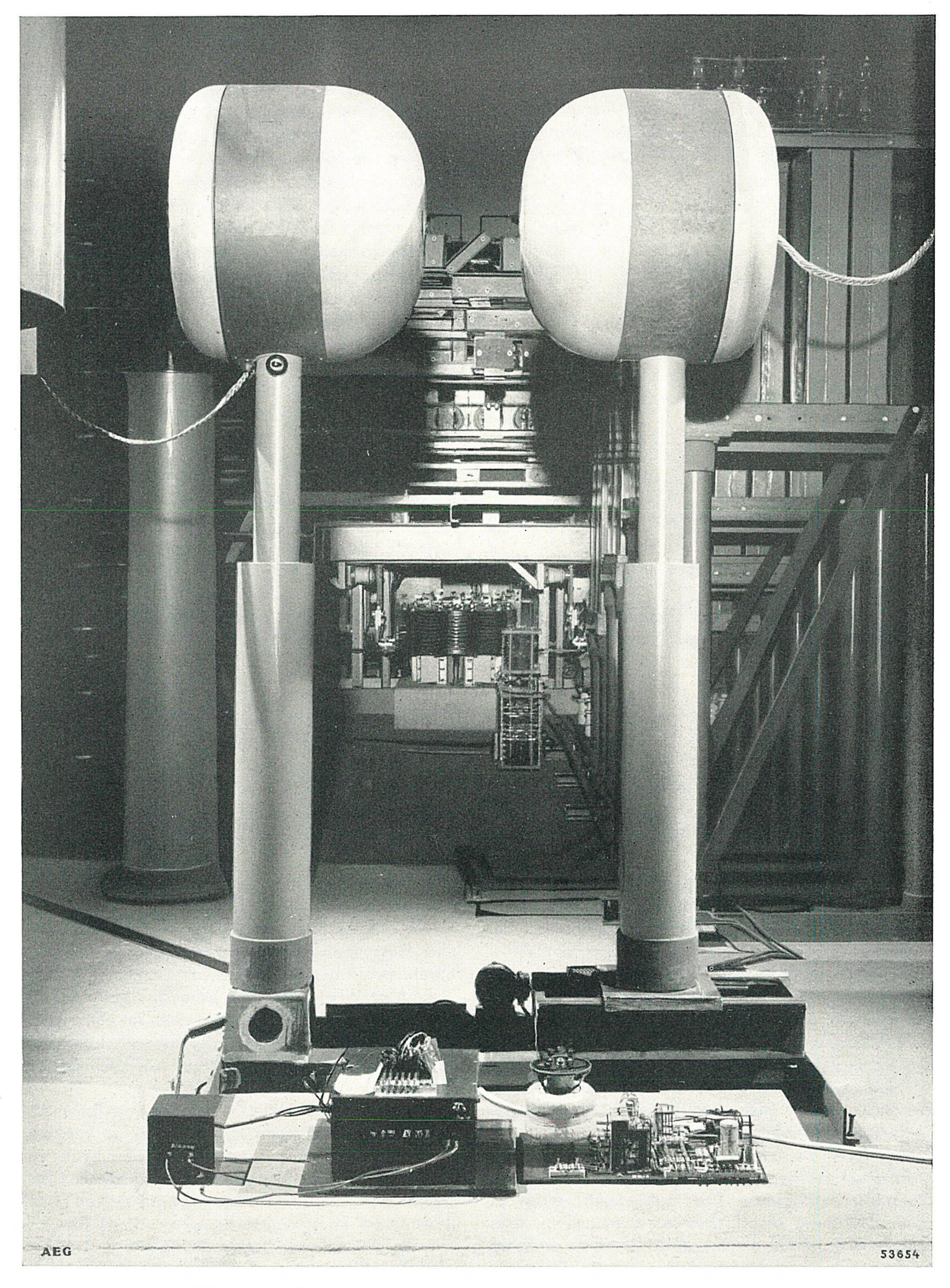


Bild 2. Schaltfunkenstrecke

leistung verwendet wurden. Die Batteriespannung wird über einen Zerhacker einem Hochspannungstransformator zugeführt, der die benötigten Spannungen für die Anoden-, Gitter- und Heizkreise liefert. Analog zum Blitzgerät mußten auch hier die Leitungen abgeschirmt und die einzelnen Kreise gut gegeneinander abgeblockt werden, um eine einwandfreie Stabilisierung der verschiedenen Potentiale zu erhalten.

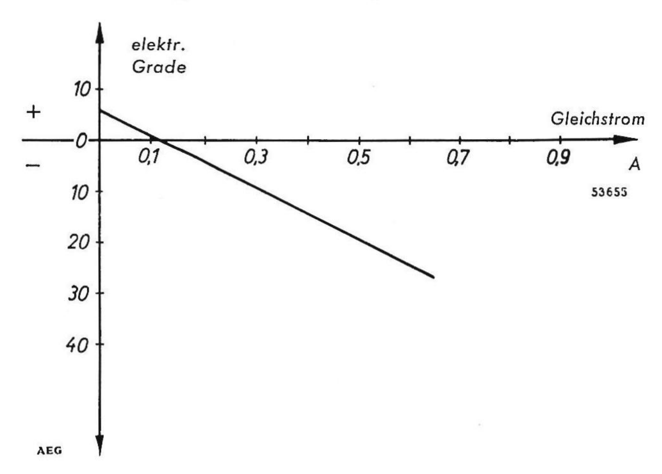


Bild 3. Abhängigkeit der Impulsverschiebung von der Vormagnetisierung

Durch die geringe Leistungsfähigkeit der Photozelle war der Bau eines zweistufigen Verstärkers erforderlich. Zur Vermeidung von Streuungen, die bei induktiver und kapazitiver Kopplung auftreten, sind die beiden Verstärkerstufen galvanisch miteinander verbunden. Die zweite Verstärkerstufe gleicht im Prinzip dem Verstärker im Blitzgerät, da auch hier ein Kondensator über einen Zündtransformator zu entladen ist.
Der Zündtransformator liegt sekundärseitig mit einem Pol an der Kugel und mit dem anderen an einer Stiftelektrode, die isoliert durch die Kugelwand nach außen geführt ist (Bild 1). Bei Impulsgabe liefert der Zündtransformator einen Spannungsimpuls, der die Hilfsfunkenstrecke „Kugel-Elektrode" zum Überschlag bringt. Der entstehende Zündfunke bewirkt eine Vorionisierung, die den Überschlag an der Hauptfunkenstrecke einleitet.
Mit der beschriebenen Anordnung nach Bild 1 lassen sich die oben gestellten Aufgaben in sicherer Weise lösen und damit die Forderungen erfüllen, die bei der Weil-Schaltung an die Steuerung gestellt werden. Die Erprobung der Steuerung im praktischen Prüfbetrieb bewies die Vorteile einer solchen elektronischen Steuerung gegenüber anderen, insbesondere gegenüber mechanischen Verfahren. Diese Vorteile bestehen darin, daß die Eigenzeit gering ist und außerdem kompensiert werden kann, daß die gesamte Streuung vernachlässigbar klein ist und daß der Impuls direkt vom Vorgang, also vom Kurzschlußstrom, abgeleitet wird.

DAS HOCHSPANNUNGS-VERSUCHSFELD

Richard Crämer

DK 621.317.2.027.3/.8

Das stetige Anwachsen der für die elektrische Energieübertragung verwendeten Spannungen, die steigenden Ansprüche an die Betriebssicherheit der Hochspannungsgeräte und das Auftauchen neuer Isolierstoffe stellen den Hochspannungstechniker täglich vor neue Probleme. Er kann diese nur dann mit Aussicht auf Erfolg anpacken, wenn er neben dem unentbehrlichen theoretischen Rüstzeug über die Versuchseinrichtungen verfügt, die ihm ein Eindringen in die Geheimnisse der Natur ermöglichen, die sich gerade hier dem forschenden Menschen gegenüber oft recht spröde zeigt.
Mehr noch als durch ihre Betriebsspannung sind Hochspannungsgeräte und Freileitungen durch gelegentlich auftretende Überspannungen gefährdet, deren Höhe ein Mehrfaches der normalen Betriebsspannung erreichen kann und deren steiler zeitlicher Verlauf sich oft recht ungünstig auswirkt. Damit die sich so ergebenden Beanspruchungen in einem modernen Hochspannungs-Laboratorium nachgebildet werden können, muß dieses über entsprechende Spannungsquellen und über Meßeinrichtungen verfügen, die es gestatten, das Verhalten der Isolierstoffe und Isolationsanordnungen gegenüber den Spannungsbeanspruchungen zu verfolgen.
Im Hochspannungs-Versuchsfeld sind also in erster Linie Messungen der elektrischen Festigkeit durchzuführen, d. h es ist die Höhe der Durchschlag- oder Überschlagspannungen der Versuchsobjekte zu bestimmen und deren Betriebsverhalten im elektrischen Feld zu prüfen. Zum mindesten soll festgestellt werden, ob die Prüflinge einer vorgeschriebenen Spannung standhalten.
Da wir es bei der Energieübertragung im allgemeinen mit Wechselspannungen zu tun haben, so beginnen die Messungen meist mit Wechselspannungen von 50 Hz. Für die Sicherheit gegen atmosphärische Überspannungen ist die Stoßspannungsfestigkeit maßgebend, die im allgemeinen entsprechend dem genormten Verlauf mit Stoßspannungen von 1 Mikrosekunde Stirndauer und 50 Mikrosekunden Halbwertdauer ermittelt wird. Die Frequenz von Schaltüberspannungen liegt oft in einem Gebiet zwischen der Netzfrequenz und der von Stoßspannungen; es ist dann notwendig, für die Prüfungen auch Hochfrequenzspannungen heranzuziehen. Für besondere

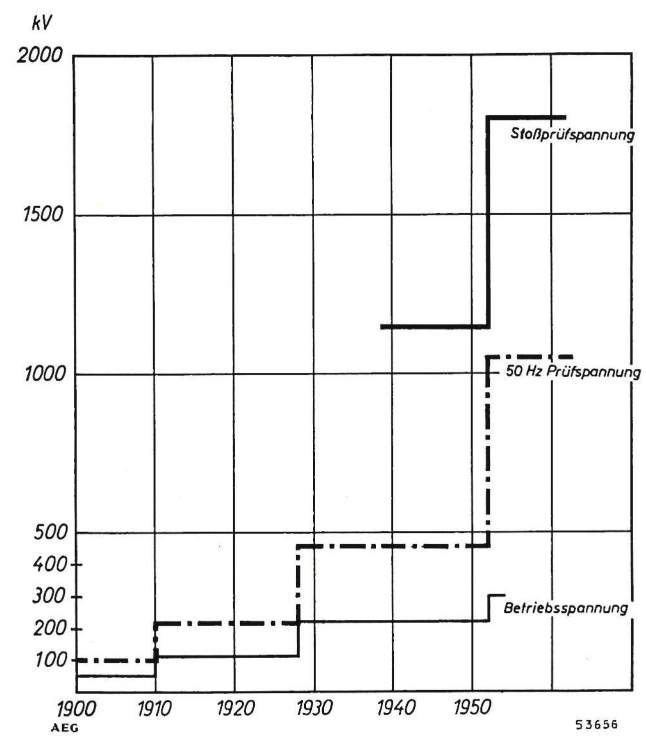


Bild 1. Anwachsen der Betriebs- und Prüfspannungen während der letzten 50 Jahre

Probleme ist die Anwendung hoher Gleichspannungen nicht zu vermeiden.

Für die Planung eines Hochspannungs-Versuchsfeldes ist die Höhe der geforderten Prüfspannungen von ausschlaggebender Bedeutung. Bild 1 zeigt das Anwachsen der Betriebsspannungen in den Übertragungsnetzen sowie das gleichzeitige Anwachsen der Prüfspannungen mit 50 Hz und der Stoßspannungen während der letzten 50 Jahre. Wenn wir auch derzeit erst mit der Entwicklung der Energieübertragung mit 400 kV beschäftigt sind, so wurde bei der Errichtung des Hochspannungs-Versuchsfeldes doch eine mögliche Erhöhung auf 600 kV berücksichtigt. Es wurden daher folgende zu erreichende Spannungswerte festgelegt:

50 Hz-Einphasen-Wechselspannung	1700 kV_{eff},	
Stoßspannung	4000 kV_{m},	40 kWs,
Gleichspannung	1700 kV_{m},	30 mA,
Hochfrequenzspannung . .	2000 kV_{eff}.	

Hochspannungs-Erzeugung

Erzeugt wird die Wechselspannung durch eine zweigliedrige Prüfkaskade für 1200 kV (Bild 2) und einen Prüftransformator für 500 kV gegen Erde, die im Bedarfsfall zur Entnahme von 1700 kV in Reihe geschaltet werden können.

Beide Stufen der Prüfkaskade, die für je 600 kV ausgelegt sind, ruhen auf entsprechend hohen Hartpapierstützern. Um Spannungen von 1200 kV gegen Erde zu erzielen, werden sie durch ein handbetätigtes

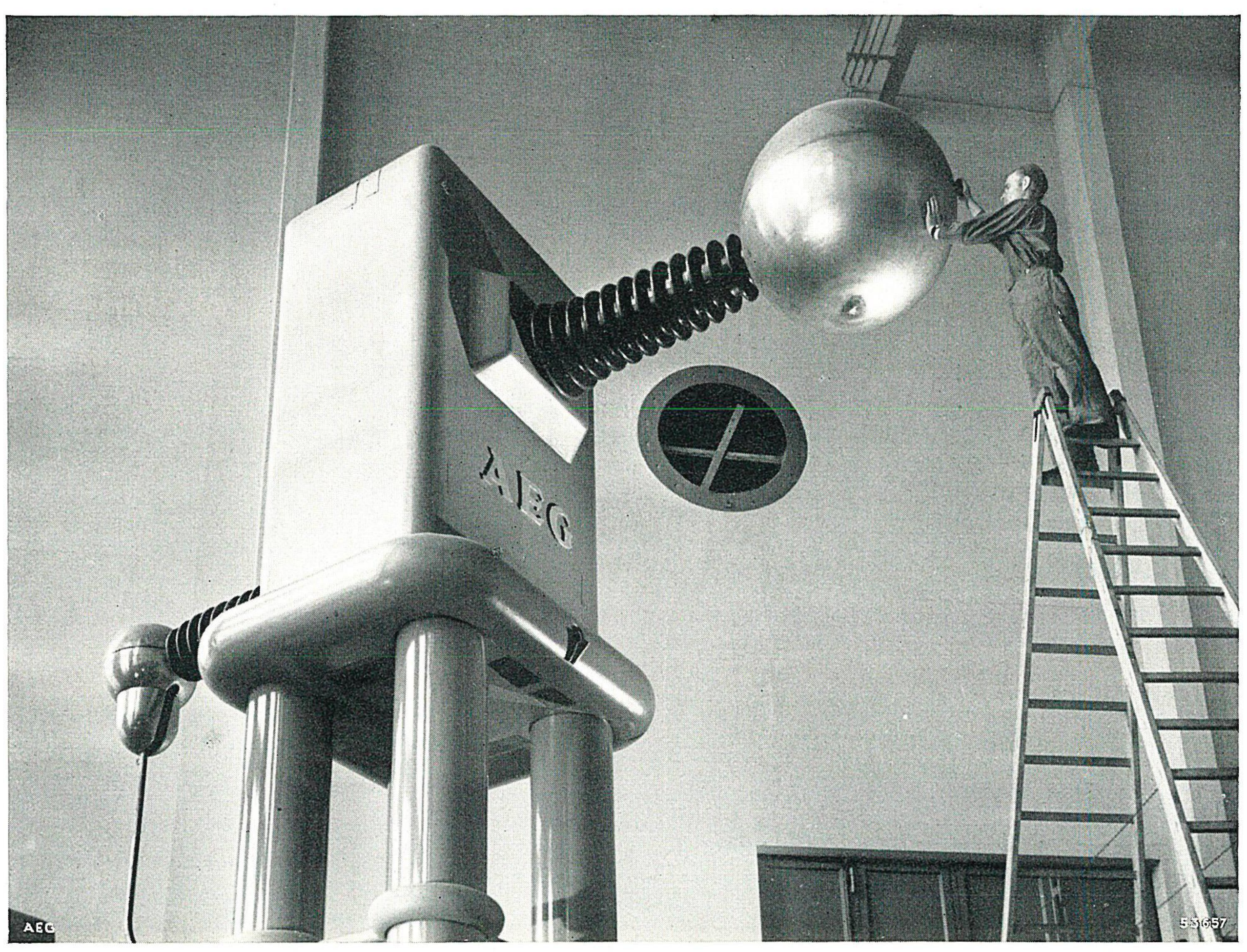


Bild 2. 1200 kV-Prüftransformatoren in Kaskadenschaltung, oberer Transformator

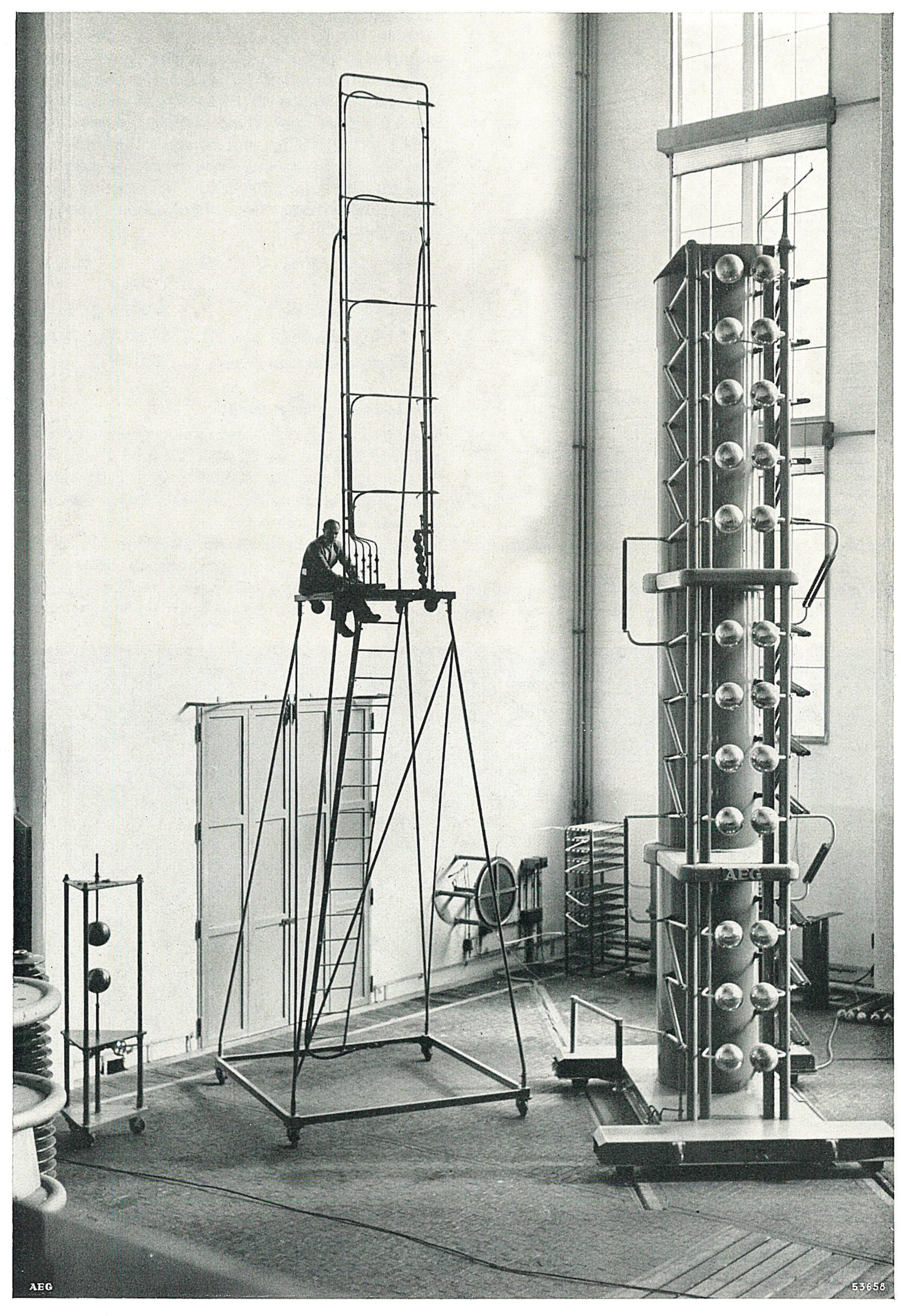


Bild 3. Beregnungsapparat und 3000 kV-Stoßgenerator

Trennmesser in Reihe geschaltet. Für Spannungen unterhalb von 600 kV kann mit der unteren Stufe allein gearbeitet werden.
Die Eisenkerne sind zur Kompensation der Eigenkapazität der Wicklungen und einer mittleren Belastungskapazität mit Luftspalten versehen, um bei einer praktisch oberwellenfreien Spannungskurve mit geringer Generatorleistung auszukommen.
Die vom VDE vorgeschriebenen höchsten Stoßprüfspannungen werden bei der Prüfung mit abgeschnittener Welle verlangt. Um dieser Forderung auch für die Reihe 600 gerecht zu werden, wurde eine Stoßspannung von 4000 kV festgelegt. Diese Stoßspannung wird mit zwei Stoßgeneratoren für 1000 und 3000 kV gegen Erde erzeugt, die in Reihenschaltung eine Stoßspannung von 4000 kV ergeben (Bild 3).
Der 8,4 m hohe säulenförmige Stoßgenerator für 250 kV Ladespannung ist bei einem Gesamtgewicht von 11 t auf einem Fahrgestell aufgebaut und läuft auf Schienen. Zur Entnahme der genormten Spannungswellen 1|5, 1|10 und 1|50 µs sind Belastungskondensatoren eingebaut und drei auswechselbare Widerstandssätze vorgesehen. Der Energieinhalt des Generators beträgt 31,5 kWs. Zur Aufladung dient eine Selengleichrichteranlage in Spannungsverdoppelungsschaltung, verbunden mit einem fernbetätigten Polaritätsumschalter (Bild 4).
Die Umwandlung der in der zweigliedrigen Prüfkaskade erzeugbaren Wechselspannung von 1200 kV gegen Erde in Gleichspannung von 1700 kV erfolgt durch zwei fahrbare Selengleichrichter für je 500 kV und zwei transportable Selengleichrichter für 500 und 250 kV Gleichspannung (s. a. Bild 4). Die Hochspannungsgleichrichter sind aus Stäben aufgebaut, die von einem kastenförmigen Gestell aus Hartpapierleisten getragen werden und in Reihe geschaltet sind. Jeder dieser Stäbe besteht aus einem Hartpapierrohr, in dem eine große Zahl der scheibenförmigen Selengleichrichterelemente untergebracht ist. Die beiden fahrbaren 500 kV-Gleichrichter ruhen auf je sechs hohen Hartpapierstützern, die auf einem mit Gummirädern versehenen Fahrgestell befestigt sind (Bild 5). Die transportablen Gleichrichter werden im Bedarfsfalle durch entsprechend hohe Stützer isoliert aufgestellt. Zur Glättung der Gleichspannung steht eine genügende Anzahl von Kondensatoren zur Verfügung.
Die Hochfrequenzspannung von 2000 kV bei 20 kHz wird in einem Lufttransformator ohne Eisenkern in Verbindung mit einer Kondensatorbatterie erzeugt (Bild 6). Dieser Transformator ist in seiner äußeren Form ein 4 m hoher Hartpapierzylinder von 1,6 m Durchmesser mit einem großen Strahlungsring am oberen Ende. Er ruht auf einem mit Gummirädern versehenen Fahrgestell und wird bei Nichtgebrauch in einer Ecke abgestellt. Schwingkapazität und fernbetätigte Löschfunkenstrecke befinden sich betriebsbereit in einer abgedeckten Grube.
Für die Speisung der Hochspannungserzeugungsanlagen und für besondere Versuche können Drehstromgeneratoren bis zu einer Leistung von 1500 kVA über

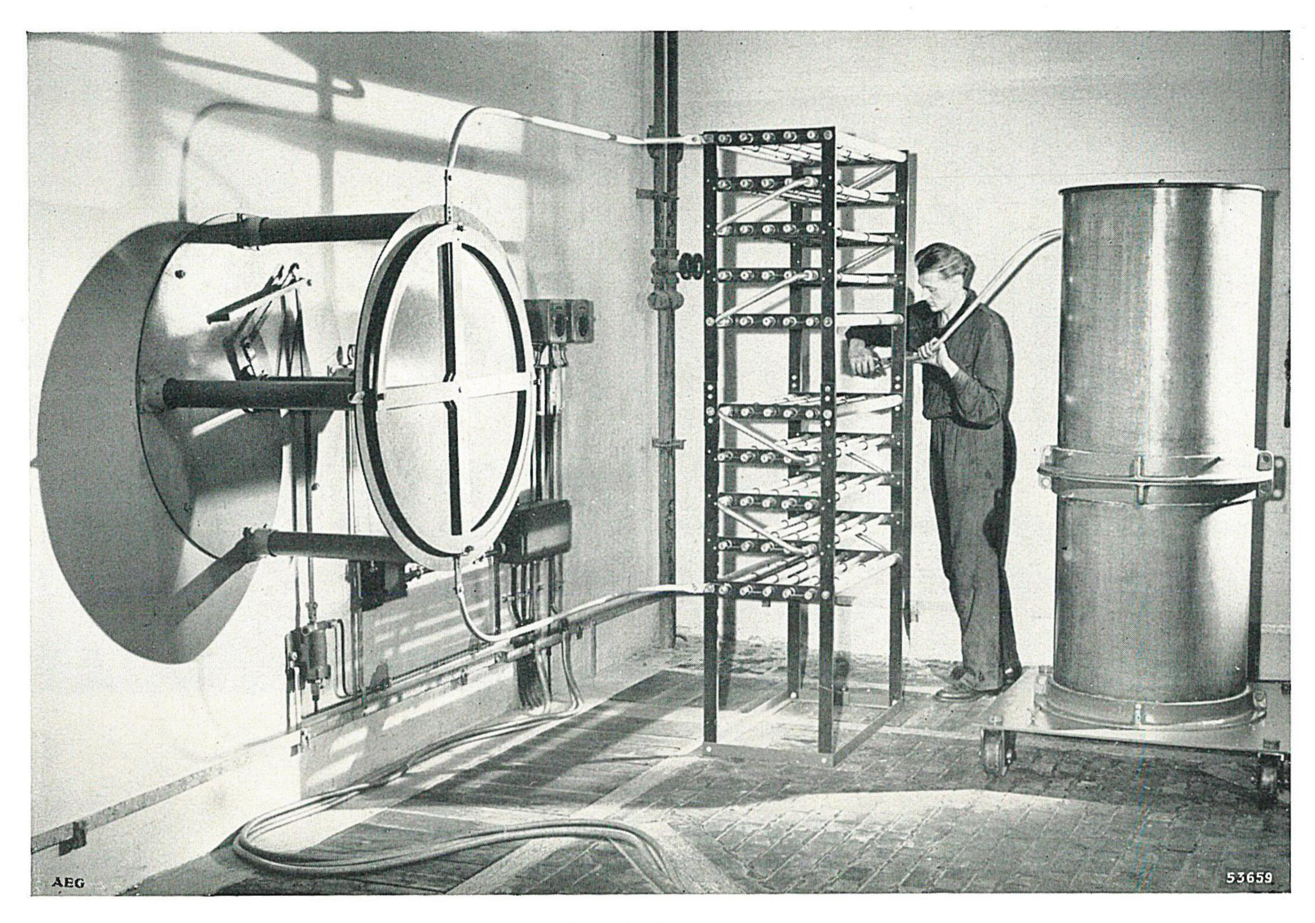


Bild 4. Selengleichrichter mit Polaritätsumschalter für 250 kV

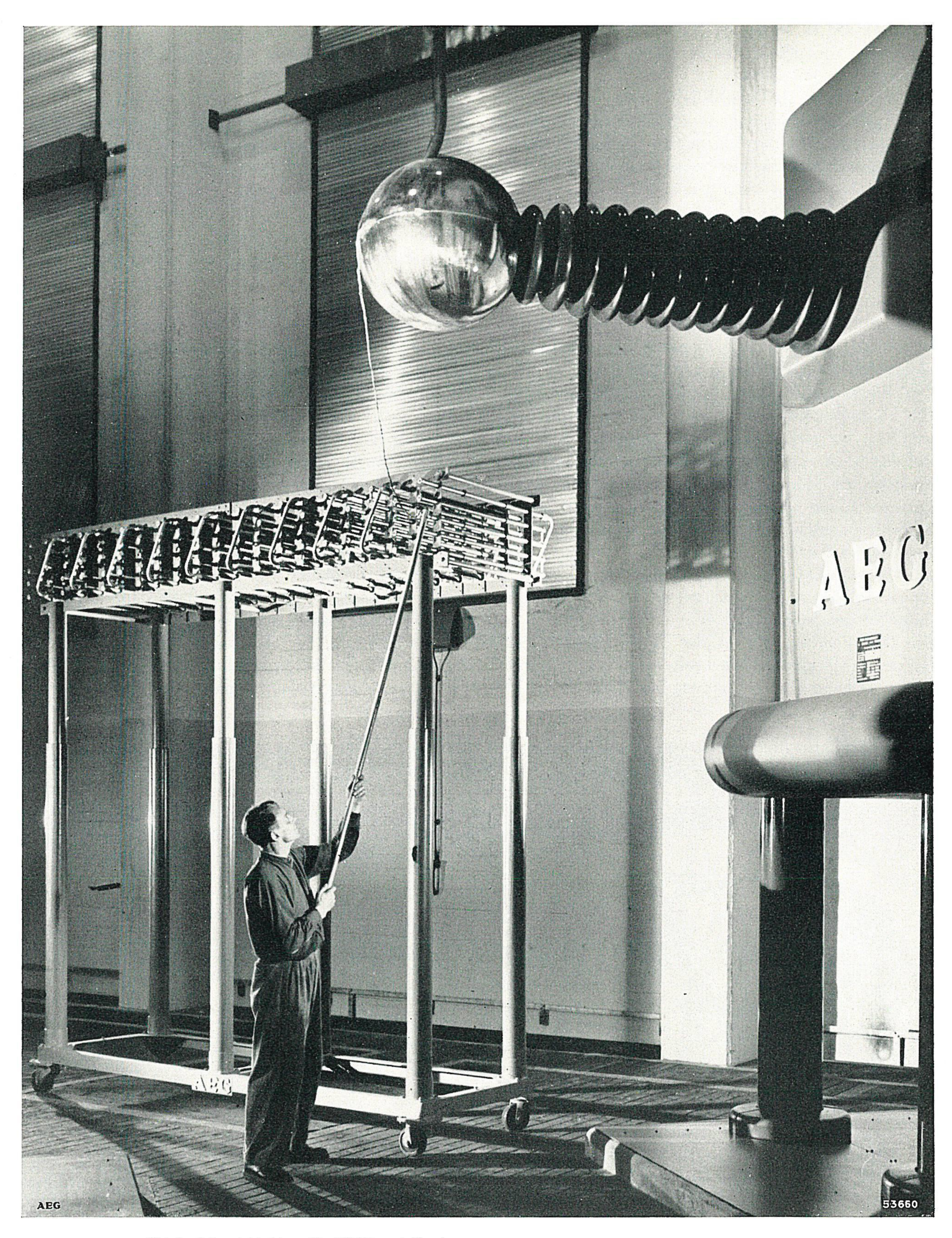


Bild 5. Selengleichrichter für 500 kV und 30 mA

Kreuzschienenverteiler zu den Schaltpulten und Arbeitsplätzen geschaltet werden. Die Spannungseinstellung erfolgt stufenlos durch Einstellen des Gleichstromes der Erregerwicklungen der Drehstromgeneratoren.

Hochspannungs-Messung

Ein besonderes Problem ist die Messung der hohen Spannungen, die nach den einschlägigen Regeln des VDE mit Kugelfunkenstrecken vorzunehmen ist. Es

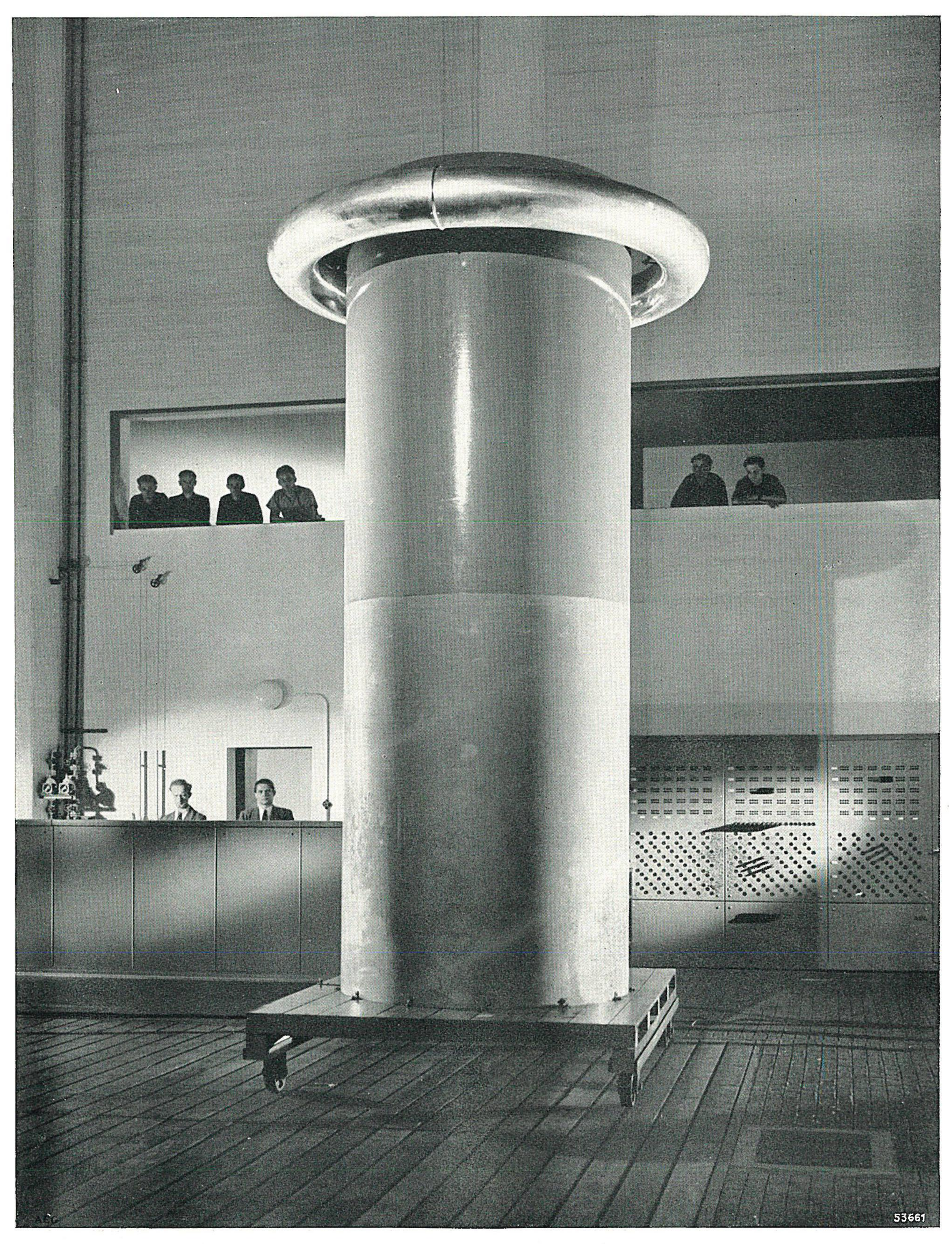


Bild 6. Hochfrequenztransformator für 2000 kV_{eff}, 20 000 Hz

ist daher eine Reihe von solchen Kugelfunkenstrecken vorhanden, von denen die größte, im Höchstspannungsraum aufgestellte, einen Kugeldurchmesser von 1500 mm aufweist. Sie hat lotrecht übereinander angeordnete Kugeln und ist zwischen den beiden Spannungserzeugern aufgestellt (Bild 7). Die untere verstellbare Kugel ist mit ihrem Antrieb auf einem Fahrgestell auf Schienen angeordnet



Bild 7. Kugelfunkenstrecke mit 1500 mm Kugeldurchmesser

und kann ebenso an die Fensterwand gefahren werden wie die obere Kugel.
Bei beiden Stoßgeneratoren werden die eingebauten Belastungskondensatoren als Spannungsteiler für 1000 und 3000 kV benutzt, wobei die durch eine besondere Röhrenschaltung gleichgerichteten Teilspannungen an elektrostatischen Instrumenten am Schaltpult abgelesen werden. Mit diesen Meßeinrichtungen

lassen sich Steh- und Überschlagstoßspannungen schneller und sicherer als mit Meßfunkenstrecken ermitteln.

Ausgestaltung der Räume

Hochspannungsräume müssen so groß bemessen sein, daß Überschläge nach Erde und an den Isolatoren der Hochspannungserzeugungsanlagen bei voller Erregung mit Sicherheit vermieden werden. Die elektrische Festigkeit der Luft nimmt mit der Höhe der Spannung im Gebiet über 1000 kV, insbesondere bei Wechselspannung, stark ab. Die vorgesehenen hohen Spannungen erfordern deshalb große Abstände aller spannungführenden Teile und Verbindungsleitungen gegeneinander und gegen Erde. Versuchsobjekte müssen zur Vermeidung von Feldverzerrungen genügenden allseitigen Abstand haben. Nur dann ist mit einer sicheren und reproduzierbaren Feststellung ihrer elektrischen Festigkeit zu rechnen.

Für einen möglichst störungsfreien gleichzeitigen Ablauf mehrerer Entwicklungsarbeiten wurden zwei Versuchsräume nebeneinander, ein Höchstspannungs- und ein Hochspannungsraum, vorgesehen. Im Höchstspannungsraum wird im allgemeinen mit Spannungen bis 1200 kV, 50 Hz und 3000 kV Stoßspannung gearbeitet; im Hochspannungsraum stehen Wechselspannungen bis 500 kV, 50 Hz und Stoßspannungen bis 1000 kV zur Verfügung. Um die oben genannten Höchstwerte zu erreichen, werden die Hochspannungserzeuger beider Räume gekuppelt.

Der in Eisenbeton ausgeführte Höchstspannungsraum mit einer Grundfläche von 20×25 m² und einer nutzbaren Höhe von 17 m erfüllt bei den gewählten Höchstspannungen die oben angeführten Forderungen. Zur Vermeidung von Radiostörungen in der Umgebung des Institutes durch hochfrequente Entladungsvorgänge sind in die Wände, in den Fußboden und in die Decke geerdete Drahtgitter eingelegt. Bei geschlossenen Eisentüren und heruntergelassenen Metalljalousien ist der Raum einem Faradayschen Käfig vergleichbar; Versuche erwiesen seine ausreichende Abschirmung. Eine Längswand des Höchstspannungsraumes ist mit fünf hohen Fenstern versehen, so daß alle Versuchsvorbereitungen bei Tageslicht vorgenommen werden können. Durch fünf nebeneinanderliegende breite Mauerdurchbrüche in der gegenüberliegenden Wand, und zwar in Höhe des ersten Stockwerkes des anliegenden Gebäudes, können Besucher ohne Störung von einem Längsgang aus den Raum besichtigen und Versuche beobachten (s. Bild 6). Als Fußbodenbelag wurde Holzpflaster verwendet.

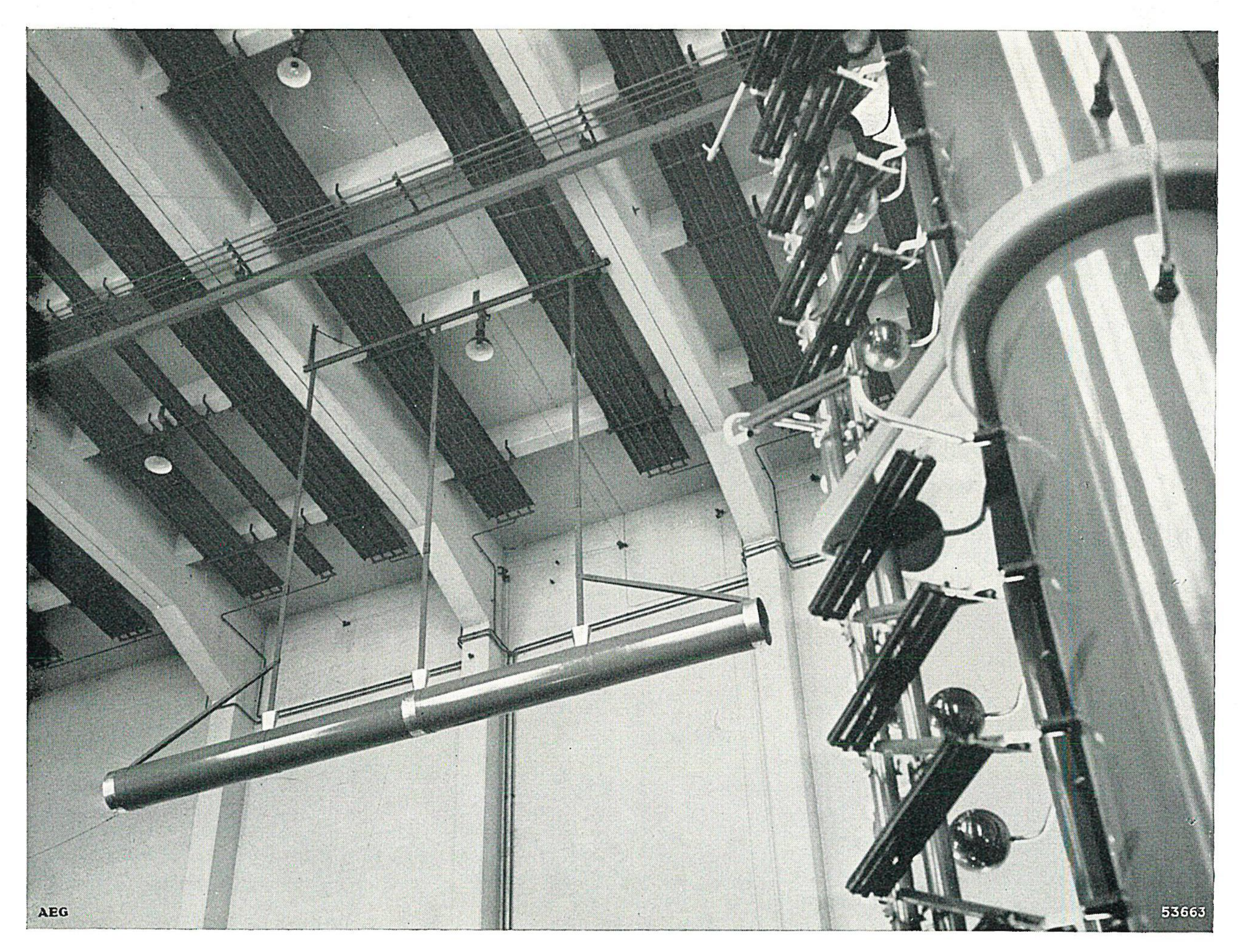


Bild 8. Dämpfungswiderstand für die 1200 kV-Prüftransformatoren; darüber sind die an der Decke verlegten Strahlungsheizkörper sichtbar

Für Beregnungsversuche an Hochspannungsgeräten und Freileitungs-Hängeketten ist in der Mitte des Raumes ein Holzrost von 30 m² mit einem Wasserablauf in den Fußboden eingesetzt (s. Bild 3). An der Decke ist in der Längsrichtung eine Laufschiene mit einer Laufkatze für 3 t angebracht. Bemerkenswert ist die Raumheizung, die durch eine an der Decke angeordnete, von der Fernheizung des Werkes gespeiste Strahlungsheizung bewirkt wird. Sie besteht aus einer Anzahl parallel laufender und miteinander verbundener glatter Stahlrohre von 50 mm Außendurchmesser (Bild 8). Die Rohre sind durch Glaswolle gegen die Decke isoliert und erwärmen durch Strahlung den Fußboden, der seinerseits die Wärme an die Luft abgibt. Die völlig geräuschlose Anlage arbeitet mit etwa 30% Kohlenersparnis und bedarf keiner längeren Anlaufzeit; sie bietet den großen Vorteil, daß der ganze Raum auch in vertikaler Richtung gleiche Lufttemperaturen aufweist.

Im Höchstspannungsraum stehen die Wechselspannungs-Prüfkaskade für 1200 kV gegen Erde (Bild 2) und der 3000 kV-Stoßgenerator (Bild 3) in je einer Ecke der Fensterwand des Raumes.

Bei Wechselspannungsversuchen bis zu einer Spannung von 1700 kV, die den größten Raumbedarf beanspruchen, kann der eigentliche Versuchsraum durch Zurückfahren des Stoßgenerators und der Meßfunkenstrecke auf das notwendige Maß vergrößert werden. In einem Abstand von 6 m unter der Decke ist in der Längsrichtung in einem 8 m langen Hartpapierrohr ein Dämpfungswiderstand mit Mittelanzapfung an Hartpapierleisten aufgehängt (Bild 8), der zum Schutz der Prüfkaskade gegen Sprungwellen und zur Schonung der Kugeloberfläche der Meßfunkenstrecke dient.

Das Schaltpult ist zu ebener Erde in geringem Abstand von der mit Mauerdurchbrüchen versehenen Wand aufgestellt. Von hier aus werden die Hochspannungs-Erzeugungsanlagen geschaltet und gesteuert sowie die Meßfunkenstrecke mit genauer Fernanzeigevorrichtung eingestellt. Die Sicherheitseinrichtungen, die Rolljalousien und die Verdunklungsanlage mit pneumatischem bzw. elektrischem Antrieb, ebenso wie die Beregnungsanlage mit der Leitfähigkeitsmeßeinrichtung, werden gleichfalls vom Pult aus betätigt (Bild 9).

Eine Durchführung für 1000 kV Wechselspannung in der fensterlosen Außenwand ermöglicht die Vornahme von Hochspannungsversuchen im Freien.

Durch eine große eiserne Tür ist der Höchstspannungsraum mit dem Hochspannungsraum von 9×10 m² Bodenfläche und 6 m Höhe verbunden. Die Aufstellung der Apparate ist ähnlich wie im Höchstspannungsraum. In den beiden Ecken der Fensterwand sind auf der einen Seite der 500 kV-Prüftransformator auf vier Hartpapiersäulen und auf der anderen Seite ein 1000 kV-Stoßgenerator mit eingebauter Belastungskapazität für 125 kV Ladespannung und einem Energieinhalt von 10 kWs angeordnet. Zur Aufladung dient ein in einem Hartpapierbehälter untergebrachter

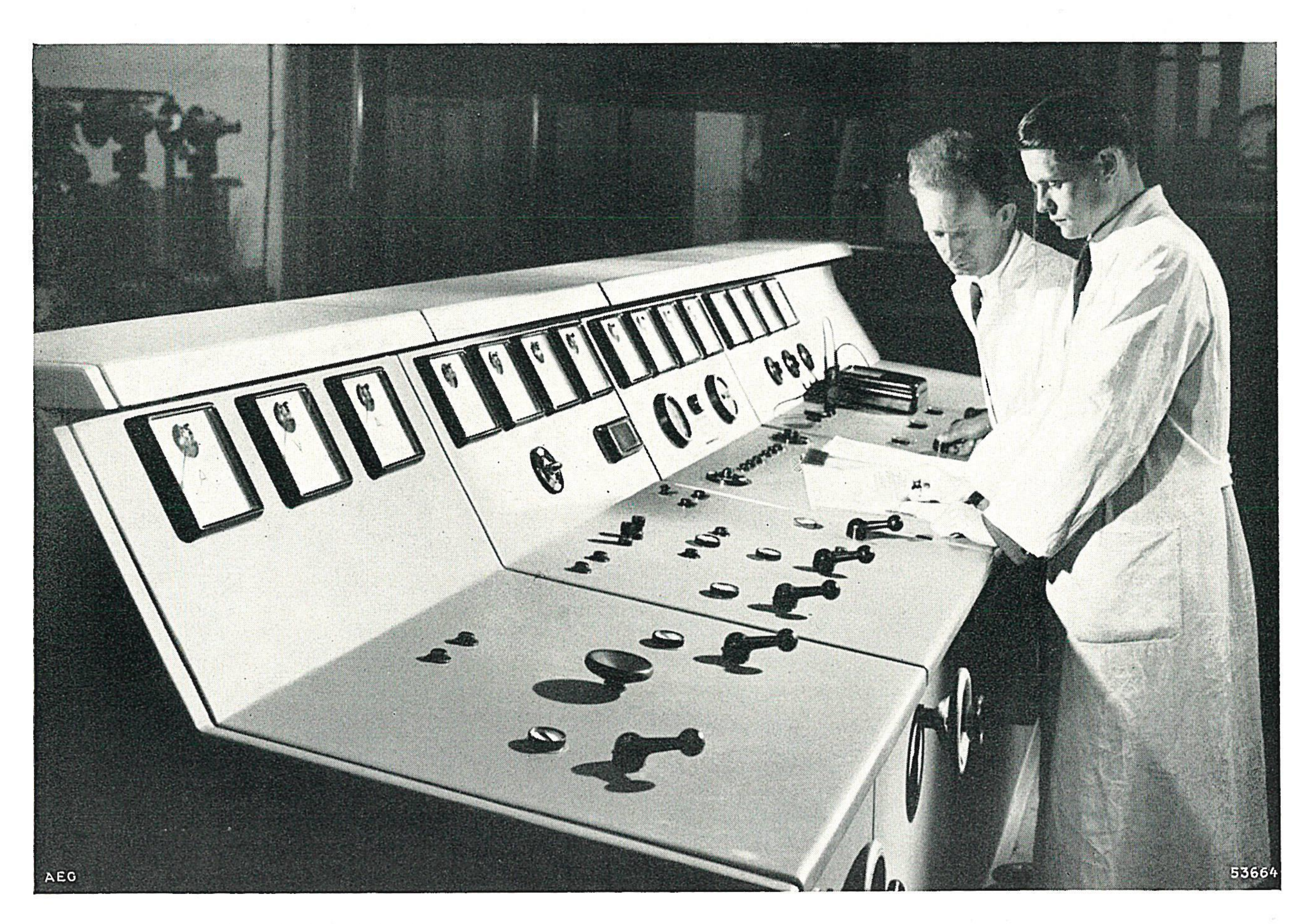


Bild 9. Großes Schaltpult

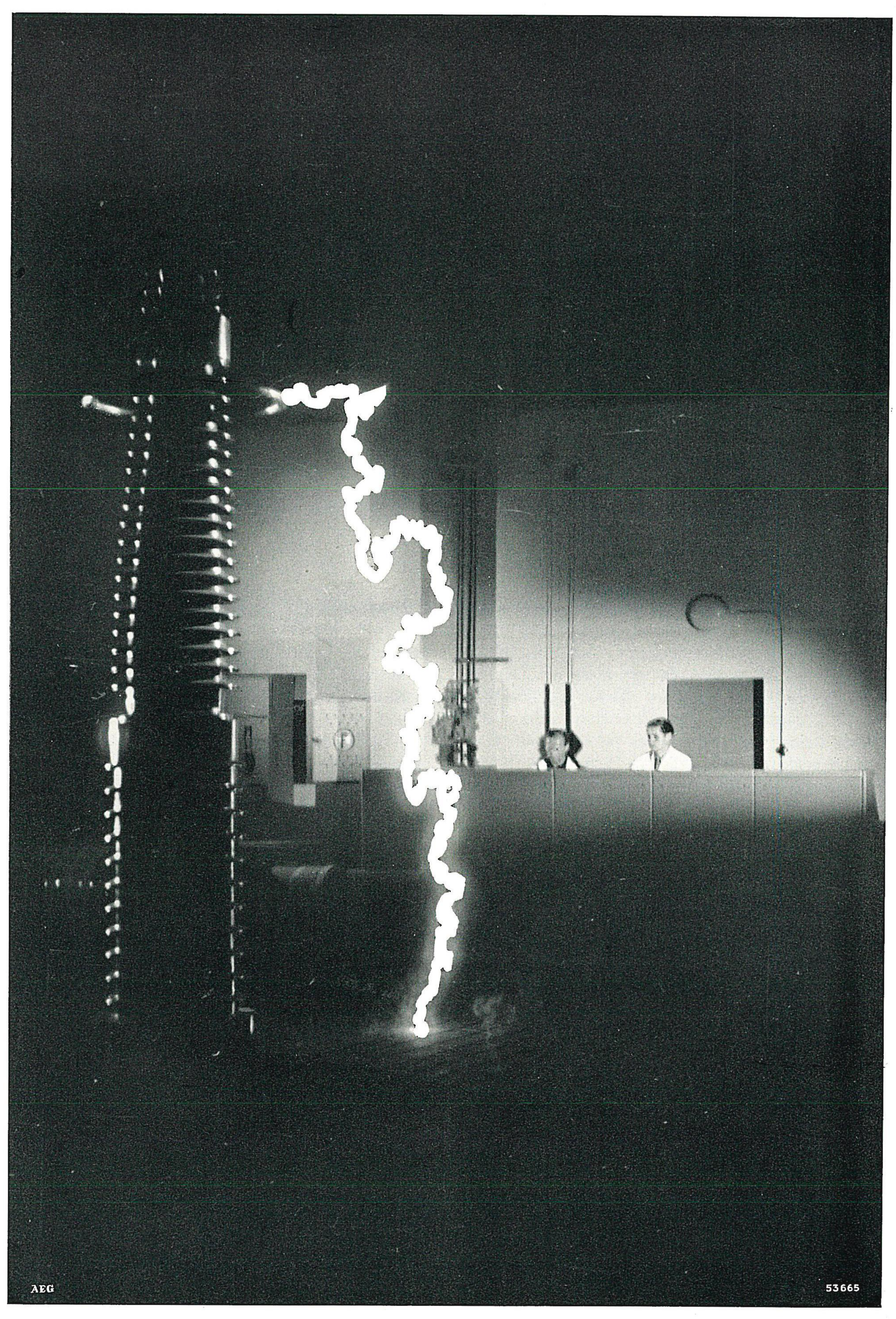


Bild 10. Überschlag an einem 400 kV-Stützer bei 50 Hz

Röhrengleichrichter mit angebautem Polaritätsumschalter. Drei vorhandene Widerstandssätze ermöglichen die Entnahme der genormten Spannungswellen 1|5, 1|10 und 1|50 μs. Zwischen den beiden Apparaten befindet sich eine Meßfunkenstrecke mit 750 mm Kugeldurchmesser in der gleichen Bauart wie die des Höchstspannungsraumes. Ein an der Decke hängender Dämpfungswiderstand schützt auch hier den Prüftransformator und die Meßfunkenstrecke.
Das Schaltpult unterscheidet sich von dem oben beschriebenen nur durch eine geringere Felderzahl.
Zu erwähnen ist noch, daß die notwendigen Hochspannungs-Verbindungsleitungen bei der Reihenschaltung beider Prüftransformatoren bzw. beider Stoßgeneratoren zur Erzielung einer Wechselspannung von 1700 kV bzw. einer Stoßspannung von 4000 kV durch die geöffnete Verbindungstür geführt werden.

Die Prüfkaskade und der 500 kV-Transformator werden von den speisenden Maschinen durch Trennschalter getrennt, welche von den Warten aus gut sichtbar sind. Eine Erdung der Hochspannungspole ist deshalb unnötig. Die Stoßgeneratoren werden durch fernbetätigte Erdungsmesser zusammen mit den Ladeeinrichtungen entladen und damit spannungslos gemacht. Der Verschluß der beiden großen Türen des Höchstspannungsraumes erfolgt durch gut sichtbare Riegel.
Neben dem Höchstspannungsraum befindet sich noch ein besonderer Meßraum, der mit den modernsten Meßgeräten, besonders mit Kathodenstrahloszillographen hoher Schreibgeschwindigkeit ausgestattet ist. In ihm können Anordnungen für verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen aufgebaut werden, wie sie sich bei den Höchstspannungsversuchen ergeben.

STOSS-SPANNUNGSGENERATOREN UND PRÜFTRANSFORMATOREN

Rudolf Küchler

DK 621.319.53+621.314.2.084

Die höchste in Betracht kommende Betriebsspannung ist zur Zeit 400 kV. Gemäß den Leitsätzen VDE 0111/53 werden hierfür Stoßspannungen von mehr als 1800 kV und 50 Hz-Prüfspannungen von mehr als 750 bzw. 1050 kV benötigt werden, um die Beanspruchung an den Prüfobjekten bis zum Überschlag oder Durchschlag steigern zu können. Bei der Konstruktion der Stoßgeneratoren und Prüftransformatoren für das Hochspannungsinstitut der AEG wurden zunächst diese Spannungen zugrunde gelegt. Dementsprechend wurde ein Stoßspannungsgenerator mit einer Summenladespannung von 3000 kV sowie eine Prüftransformatorenkaskade für eine Wechselspannung von 1200 kV vorgesehen. Ein kleinerer Stoßspannungsgenerator für 1000 kV und ebenso ein Prüftransformator für 500 kV dienen Untersuchungen an Prüfobjekten bis zur Reihe 110. Diese in der AEG-Fabrik Stuttgart gebauten Geräte weisen einige interessante Merkmale auf, über die im folgenden berichtet wird.

Stoßspannungsgeneratoren

Der in Bild 1 (s. a. Bild 2 auf Seite 72) dargestellte 3000 kV-Stoßspannungsgenerator wurde in der bekannten, raumsparenden Säulenbauweise ausgeführt, wobei aus Herstellungs- und Transportgründen eine Unterteilung der Säule in drei Abschnitte vorgenommen ist. Im Innern der drei miteinander verflanschten und mit Kabelisolieröl gefüllten Hartpapiergehäuse sind insgesamt zwölf Stoßkondensatorstapel für je 250 kV Ladespannung unter Zwischenfügung von ebenso vielen in Reihe geschalteten Belastungskondensatorpaketen übereinander angeordnet. Die Aufladung und Entladung der Stoßkondensatoren erfolgt in der nach Marx benannten Vervielfachungsschaltung nach Bild 2. Die hierfür erforderlichen, einstellbaren Funkenstrecken F_z sind — ebenso wie die Lade-, Entlade- und Dämpfungs-Widerstände R_l, R_e und R_d — vor den Hartpapiergehäusen in Luft angeordnet und über Durchführungen in den Gehäusewandungen mit den Stoßkondensatorstapeln verbunden. Die Funkenstrecken F_z werden durch einen im Fahrgestell untergebrachten Motorantrieb eingestellt, der eine gegenläufige Drehung der die Funkenstrecken tragenden, durchlaufenden beiden Hartpapierrohre bewirkt. Dabei kann die Schlagweite mit einer mechanisch gekuppelten Anzeigevorrichtung am Fahrgestell auf größere Entfernung abgelesen werden. Bei einer Gesamthöhe von nur 8400 mm beträgt, mit Rücksicht auf die Standsicherheit, die vom Fahrgestell bedeckte Grundfläche 2700×3400 mm². Ein auf die Spurkranzrollen wirkender Handantrieb gestattet, den Stoßspannungsgenerator innerhalb des Hochspannungsraumes nach Bedarf zu verschieben.
Die Reihenstoßkapazität C_s des Generators beträgt 7000 pF, woraus sich ein Arbeitsvermögen von 31,5 kWs bei der vollen Spannung von 3000 kV errechnet. Die eingebaute Belastungskapazität C_b von 800 pF sichert einerseits, bei einem Verhältnis C_b/C_s =0,114, einen guten Ausnutzungsgrad und vermindert andererseits den Einfluß der Kapazität des Prüflings auf die Form der Stoßwelle.
Die Dämpfungs- und Entladewiderstände sind so ausgelegt, daß die vom VDE genormte Stoßspannungswelle 1|50 mit einer Stirnzeit von 1 μs und einer Rückenhalbwertzeit von 50 μs erzielt wird. Durch Auswechseln der Entladewiderstände lassen sich im

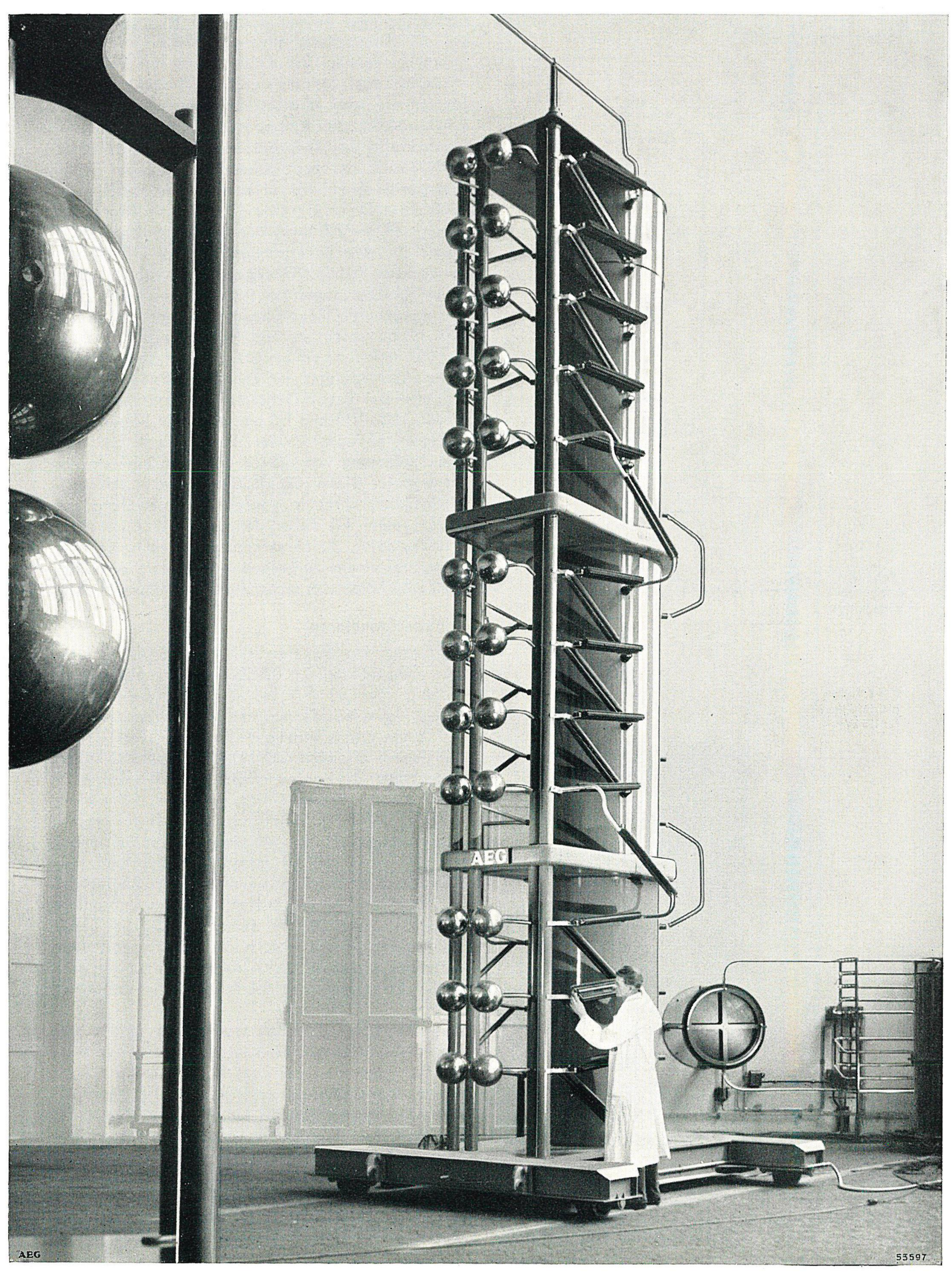


Bild 1. Stoßspannungsgenerator für 3000 kV und 31,5 kWs

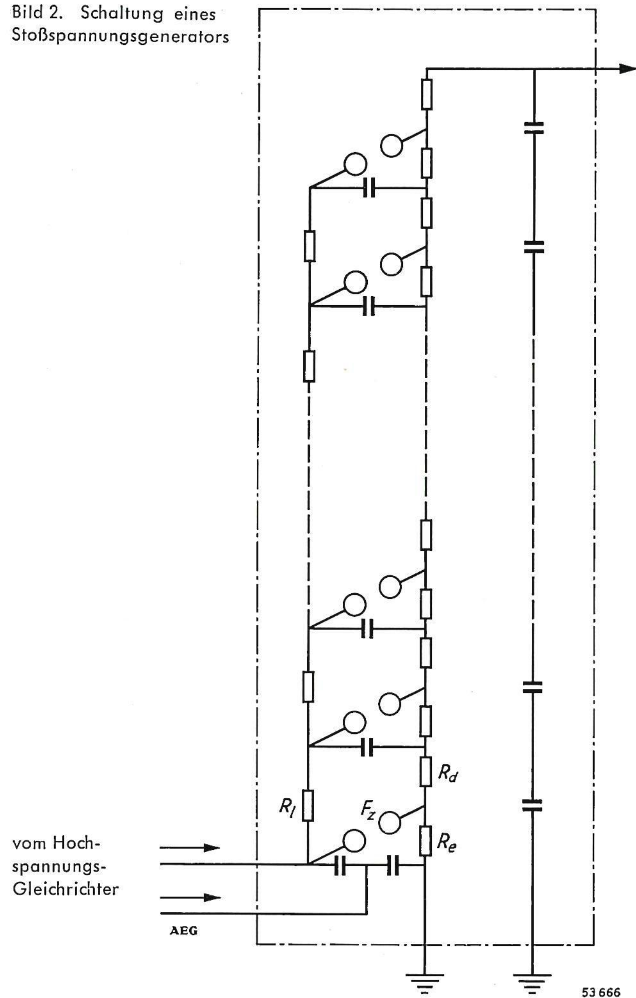


Bild 2. Schaltung eines Stoßspannungsgenerators



Bild 4. Ladegleichrichter für 125 kV

Bedarfsfall auch kürzere Stoßspannungen mit einer Rückenhalbwertzeit von 10 und 5 μs einstellen.
Dem Stoßspannungsgenerator wird über einen Transformator mit Selengleichrichter in Verdoppelungsschaltung nach Wahl eine positive oder negative Gleichspannung von 250 kV zugeführt. Die von der Ladeeinrichtung gelieferte Energie ist groß genug, um auf den Prüfling etwa vier Stöße pro Minute geben zu können. Die induktionsfrei aus Draht gewickelten Lade-, Entlade- und Dämpfungswiderstände sind in thermischer Hinsicht entsprechend bemessen.
Einen gleichartigen Aufbau zeigt der Stoßspannungsgenerator für eine Summenladespannung von 1000 kV nach Bild 3, der entsprechend der auf ein Drittel reduzierten Spannung nur eine Gesamtbauhöhe von 3000 mm aufweist. Die Grundfläche des Fahrgestelles beträgt 1800×3200 mm². Der Generator ist in zwölf Stufen für eine Ladespannung von je 125 kV aufgeteilt. Seine Reihenstoßkapazität C_s beträgt 20 000 pF, sein Arbeitsvermögen bei voller Spannung 10 kWs. Der eingebaute Belastungskondensator C_b ist für 1100 pF bemessen, so daß sich ein Verhältnis $C_b/C_s = 0{,}055$ und damit ein hoher Ausnützungsgrad ergibt. Unter Auswechslung der Entladewiderstände lassen sich auch bei diesem Generator die genormten Stoßwellen 1|50, 1|10 und 1|5 einstellen. Ein bequem umpolbarer Ladegleichrichter nach Bild 4 für eine Gleichspannung von 125 kV dient zur Speisung des Generators. Dieser Gleichrichter arbeitet mit zwei Hochvakuumröhren in Verdoppelungsschaltung und enthält unter Öl außer den beiden Röhren einen Transformator, die Heizwandler und einen Kondensator. Bei einem zulässigen Ladestrom von 50 mA wird eine Folge von sechs Stößen je Minute erreicht.

Prüftransformatoren

Bild 5 zeigt den kleineren Prüftransformator. Er ist für eine Übersetzung 2×0,5/500 kV und eine Nennleistung von 100 kVA bei 15 Minuten-Betrieb ausgelegt. Seine Wicklungen sind in Kaskadenschaltung auf einen zweischenkligen Eisenkern verteilt und mit diesem in einem isoliert aufgestellten Ölkasten angeordnet. Die Kurzschlußspannung wurde zu 6,7% ermittelt und reduziert sich, bezogen auf gleiche Leistung, auf 1,7 %, wenn bei geerdetem Kasten die Schubwicklung erregt wird, wobei im Leerlauf Spannungen von ±250 kV gegen Erde auftreten. Zur Kompensation der kapazitiven Blindstromaufnahme ist der Eisenkern mit fest eingestellten Luftspalten versehen. Diese sind so bemessen, daß bei unbelastetem Transformator noch eine induktive Leistungsaufnahme von etwa 30 kVA auftritt, die zur Kompensation der Ladeleistung des Prüflings zur Verfügung steht.
Aus räumlichen Gründen wurden die beiden bewickelten Schenkel des Eisenkerns nicht übereinander, sondern nebeneinander und die erdseitige Durchführung horizontal, die andere vertikal angeordnet. Das Ölausdehnungsgefäß befindet sich demgemäß am Kopf des Hochspannungspoles. Der Kasten, der eine Spannung von 250 kV gegen Erde annimmt, wird von vier Hartpapiersäulen getragen, wobei sich eine Gesamthöhe von 4000 mm ergibt.
Die 50 Hz-Prüfeinrichtung für eine höchste Betriebsspannung von 1200 kV gegen Erde ist als vierstufige Kaskade ausgebildet, wobei je zwei Stufen auf einem gemeinsamen, zweischenkeligen Kern eine Einheit

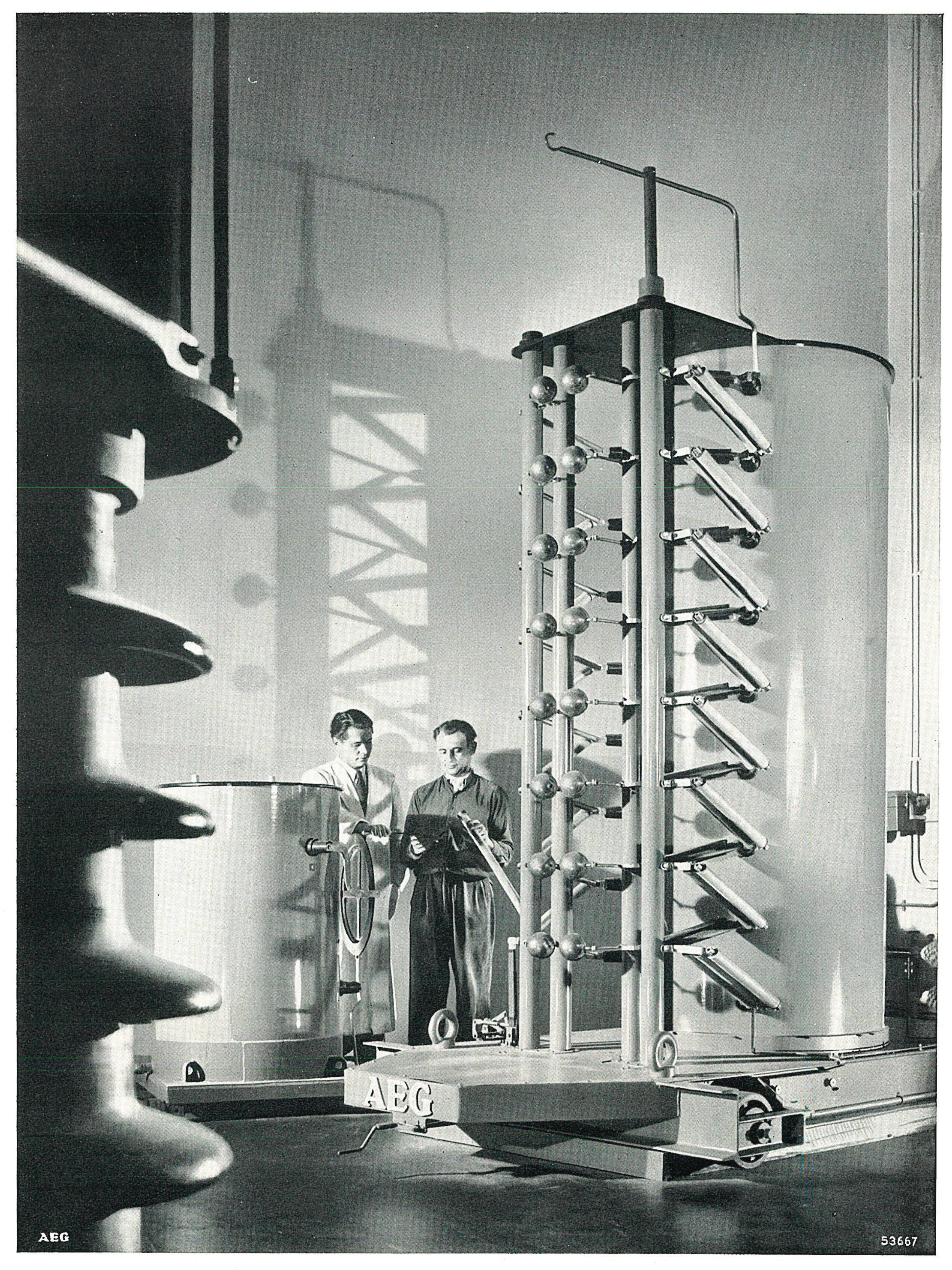


Bild 3. Stoßspannungsgenerator für 1000 kV und 10 kWs

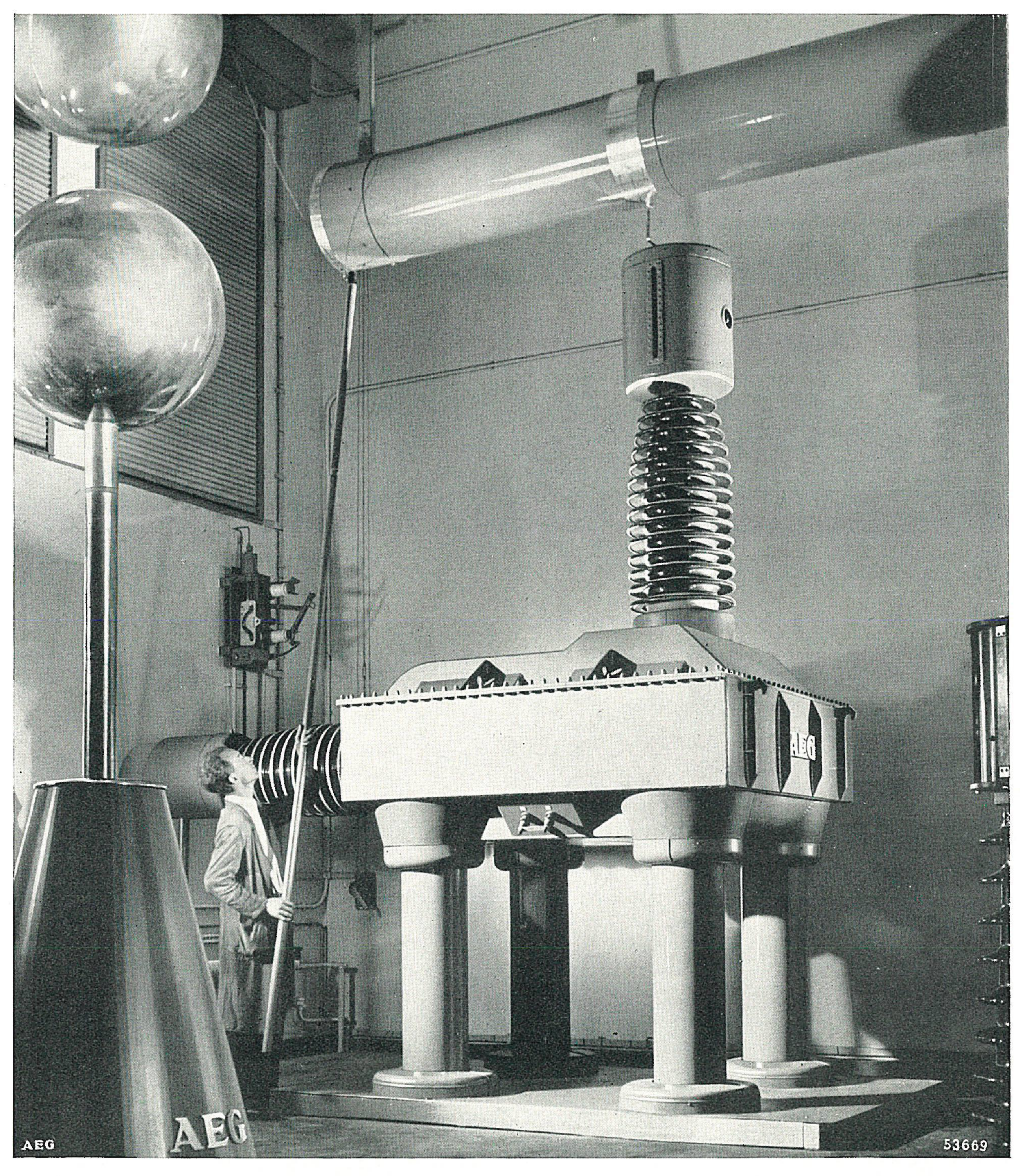


Bild 5. Prüftransformator für 500 kV und 100 kVA

bilden. Bild 6 zeigt die äußere Ansicht der Prüfkaskade. Ihre Schaltung ist in Bild 7 dargestellt. Eingespeist wird in die Wicklung I der ersten Einheit. Die vier Wicklungen II sind die in Reihe geschalteten Hochspannungswicklungen für je 300 kV. Die Verbindungen je zweier, auf einem Kern angeordneter 300 kV-Wicklungen sind mit diesem bzw. seinem Ölkasten verbunden. Den Leistungstransport von einem Schenkel zum anderen übernehmen die Schubwicklungen III, deren Enden zu Klemmen geführt sind, um die einzelnen Einheiten gegebenenfalls auch von der Schubwicklung her erregen zu können. Die Überkopplungswicklung IV dient schließlich zur Speisung der Primärwicklung I der zweiten Einheit. Bei einer Gesamtspannung von 1200 kV nimmt das Gehäuse der ersten Einheit eine Spannung von 300 kV, das der zweiten Einheit eine solche von 900 kV gegen Erde an. Die in den beiden Ölkästen angeordneten vier Durchführungen haben jeweils nur eine Spannung von 300 kV aufzunehmen und konnten daher mit

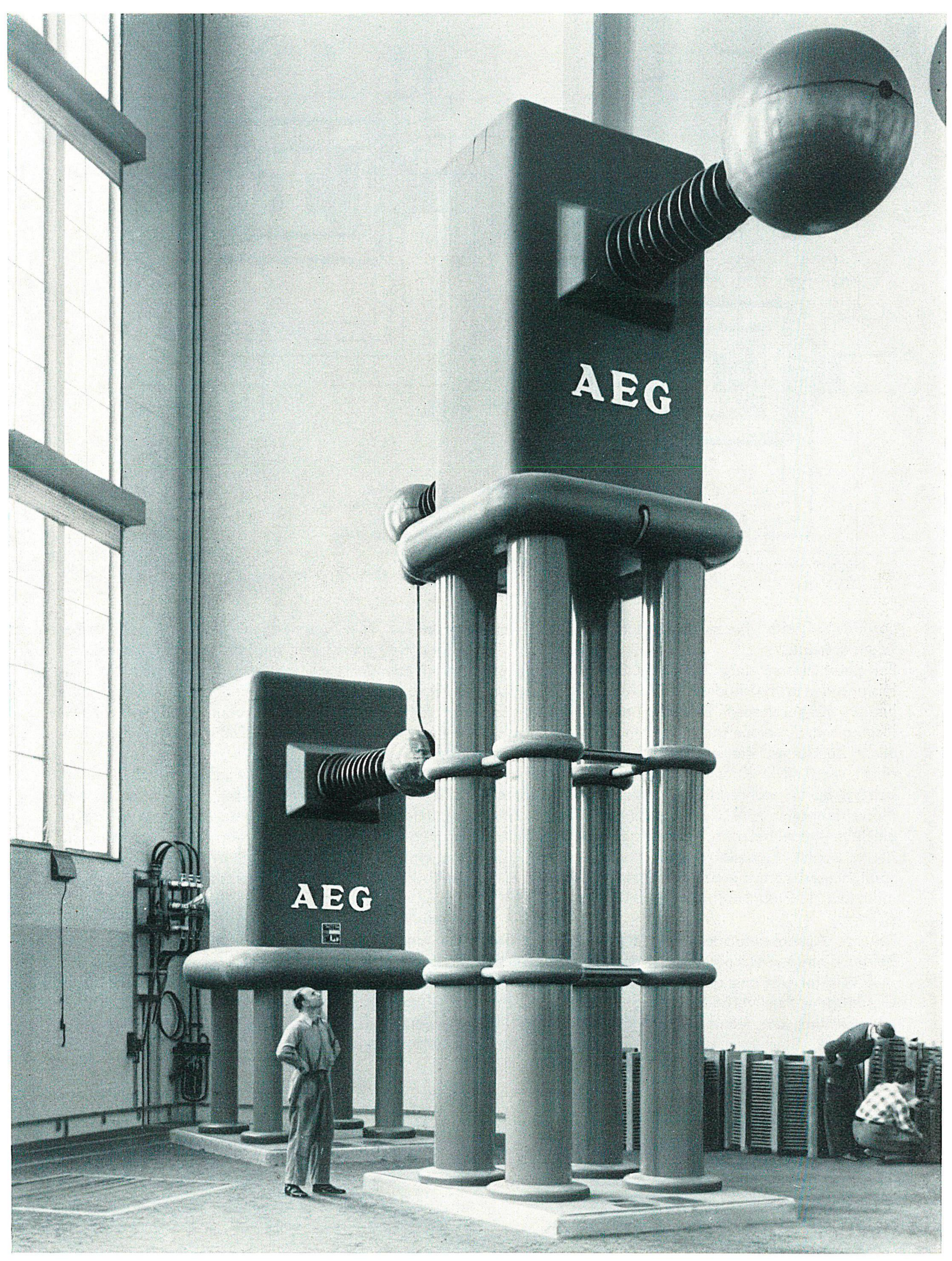


Bild 6. Prüfkaskade für 1200 kV und 1200 kVA

Bild 7. Schaltung der Prüfkaskade für 1200 kV

I Erregerwicklung
II Hochspannungswicklung
III Schubwicklung
IV Übertragungswicklung

normalen Freiluft-Porzellanen der Reihe 150 versehen werden.
Bei einer Übersetzung 3/1200 kV beträgt die Nennleistung der Prüfkaskade 1200 kVA. Die in den Wicklungen vorgesehenen Ölkanäle erlauben eine Belastung mit dieser Leistung während 15 Minuten, also einer Zeitdauer, die im Versuchsbetrieb kaum erreicht wird. Die Kurzschlußspannung jeder Einheit beträgt 8,5 %, während sich in der Reihenschaltung beider Einheiten eine Kurzschlußspannung von 29 % einstellt. Auch bei der Prüfkaskade sind die Eisenkerne beider Einheiten mit fest eingestellten Luftspalten versehen, die bei unbelasteter Kaskade eine induktive Leistungsaufnahme von etwa 140 kVA sichern.
Die mit Ausdehnungsgefäßen versehenen Ölkästen beider Einheiten schmiegen sich der Form der Kerne und Wicklungen eng an, so daß die Ölmengen und Gesamtgewichte verhältnismäßig gering sind. Zur Abschirmung der Kanten sind indessen die im Bild sichtbaren Blechummantelungen vorgesehen. Entsprechend den Spannungen, welche die Einheiten gegen Erde annehmen, sind diese auf Isoliergestellen verschiedener Höhe montiert. Da es sich um eine Innenraumanlage handelt, sind diese Isoliergestelle aus Hartpapierrohren aufgebaut. Der höchste Punkt der zweiten Einheit liegt 8260 mm über dem Erdboden.
Die elektrische Verbindung zwischen beiden Einheiten ist als zweipoliges Trennmesser ausgebildet, so daß sie unterbrochen werden kann. Auf diese Weise ist es möglich, beide Einheiten parallel zu schalten, um bei einer Spannung von 600 kV eine Leistung von 1200 kVA mit einer Kurzschlußspannung von 8,5 % verfügbar zu haben. Weiterhin läßt sich in V-Schaltung ein einpolig geerdetes Drehstromsystem mit einer Dreieckspannung von 600 kV und einer Leistung von 1000 kVA aufbauen. Erdet man den Kasten einer Einheit und erregt die Schubwicklung, so ergeben sich Spannungen von ± 300 kV gegen Erde bei einer Leistung von 2×300 kVA und einer Kurzschlußspannung von nur 1,5 %.

ZUR BESTIMMUNG DER GLIMMANFANGSSPANNUNG

Heinz Papen

DK 621.3.015.53.08

Wird an eine Isolationsstrecke eine Spannung gelegt und diese langsam gesteigert, so tritt bei einer bestimmten Spannungshöhe, der kritischen Feldstärke, eine sichtbare Entladungsform auf. In einem homogenen Feld, z. B. an einer Kugelfunkenstrecke, tritt ohne irgendeine andere Entladungsform der Durchschlag ein, während in einem inhomogenen Feld bis zum Durch- oder Überschlag mehrere sichtbare Entladungsstufen durchlaufen werden. Ist die Isolationsstrecke durch einen Stützer dargestellt, bei dem die elektrischen Kraftlinien bei Anlegen einer Spannung fast ausschließlich längs der Isolationsstrecke verlaufen, so sind die Entladungsstufen: Glimmen — Büschel — Überschlag; liegt eine Gleitanordnung vor, z. B. Durchführung oder Kondensator, bei der außer der Radial- noch eine Tangentialkomponente der elektrischen Feldstärke auftritt, so ist die Reihenfolge der Entladungsformen: Glimmen — Streifen — Gleitbüschel — Gleitfunken — Überschlag.

Das Glimmen ist also die erste Entladungsform an allen Isolationsanordnungen, wenn man von dem idealen homogenen Feld absieht, das fast ausschließlich zu Meßzwecken, z. B. in der Kugelfunkenstrecke oder im Plattenkondensator, benötigt wird. Übt das Glimmen in Luft wegen seines geringen Energieumsatzes auch meistens keine zerstörende Wirkung aus, es sei denn, daß Luft mit festem oder flüssigem Dielektrikum in Reihe geschaltet ist, so ist Glimmen unter Öl an Isoliermaterialien unbedingt zu vermeiden. Sogar in Porzellan fressen sich die Glimmpunkte millimetertief ein und bewirken hierdurch im Laufe der Zeit Absplitterungen und damit Zerstörung.

In Luft wird die Glimmanfangsspannung als erste Stufe der Ionisation meistens mit dem Auge bestimmt, d. h. die Spannung, bei der die erste sichtbare Entladung auftritt, wird als Anfangsspannung bezeichnet. Diese Festlegung ist keineswegs exakt; denn sie ist subjektiv an den einzelnen Betrachter gebunden. Sie hat jedoch den Vorzug, schnell und bequem den Glimmanfang zu bestimmen, zumal hier dem Glimmen nicht die Bedeutung beizumessen ist, wie es unter Öl der Fall ist.

In Öl oder Clophen ist die Glimmerscheinung im allgemeinen wegen der geringen Lichtdurchlässigkeit mit dem Auge schwer erkennbar, und die Differenz zwischen wahrer Glimmanfangsspannung und erstem sichtbaren Glimmen wird noch größer. Befindet sich die zu untersuchende Isolationsstrecke in einem abgeschlossenen Aggregat, z. B. einem Transformator, so kann man durch Abhorchen des Kessels stärkere Glimmerscheinungen feststellen, jedoch läßt diese Methode keine Festlegung der Glimmanfangsspannung zu. Mit der Verlustwinkelmeßbrücke ist durch Beobachtung des Vibrationsgalvanometers das Glimmen festzustellen; einmal durch Messung des Ionisationsknickes und zum anderen dadurch, daß mit dem Vibrationsgalvanometer kein genauer Abgleich mehr zu erzielen ist, das Vibrationsgalvanometer „atmet", sobald das Versuchsobjekt zu glimmen beginnt. Jedoch wird mit dieser Methode auch das Glimmen erst bei stärkerem Auftreten erfaßt.

Das Sichtbarmachen der Stromkurve durch Abgreifen der Spannung an einem Widerstand im Kathodenstrahloszillographen — sei es als Sinuskurve oder als Lissajous'sche Figur — erbringt einen weiteren Fortschritt in der Erfassung der Glimmanfangsspannung. Das Glimmen hebt sich als kleine Zacke aus der Stromkurve hervor. Das erste feine stromschwache Glimmen ist jedoch auch hiermit noch nicht festzustellen, weil die Zacken dann so klein sind, daß sie sich in der Stromkurve verlieren.

Die exakte objektive Bestimmung der Glimmanfangsspannung ist aber äußerst wichtig für Anordnungen unter Öl oder Clophen, z. B. Kondensatoren, Transformatoren, und an Anordnungen, bei denen Dielektriken verschiedenen Aggregatzustandes in Reihe zusammenarbeiten, wie getränkte Kabel. Mit dem geringsten Glimmen beginnt nämlich der Zerstörungsprozeß. Man ist bestrebt, nicht nur einen Schaden zu verhüten, sondern auch festzustellen, bis zu welcher Grenze mit der Beanspruchungsspannung gegangen werden darf. Die Wirtschaftlichkeit ist also auch in vielen Fällen von der exakten Bestimmung der Glimmanfangsspannung abhängig.

Das nachstehend beschriebene neue Verfahren geht von dem Gedanken aus, die hochfrequenten Glimmströme für sich besonders aus der Stromkurve herauszuheben, d. h. zu verstärken. Dies geschieht am einfachsten durch eine kleine Luftinduktivität L.

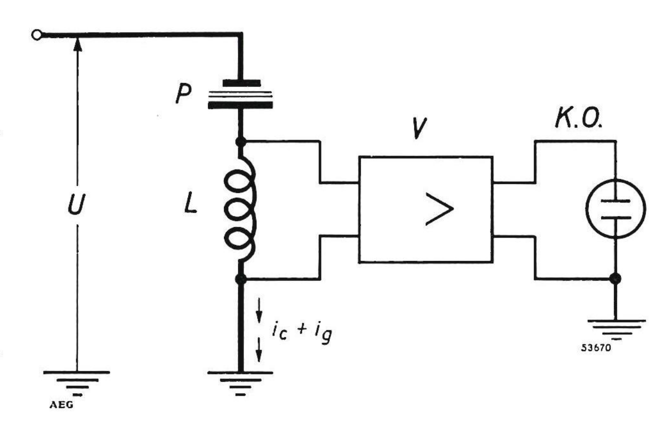


Bild 1. Meßanordnung zur Bestimmung der Glimmanfangsspannung an Prüfobjekten mit kleiner Kapazität
P Prüfling — V Gleichspannungsverstärker
L Luftinduktivität — KO Kathodenstrahloszillograph

Der Ladestrom i_c und der Glimmstrom i_g fließen durch die Luftdrossel und erzeugen einen Spannungsabfall u_L (Bild 1). Dieser Spannungsabfall wird einem empfindlichen Gleichspannungverstärker (V = 20 000) zugeführt und dann verstärkt auf den Kathodenstrahloszillographen gegeben. Der Gleichspannungs-

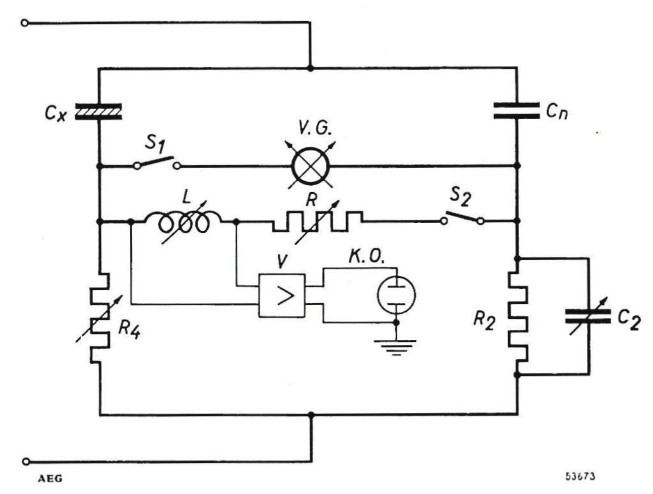


Bild 4. Messung der Glimmanfangsspannung in der Scheringbrücke
C_x Prüfobjekt
C_n, R_4, C_2, R_2 Schaltelemente der Scheringbrücke
VG Vibrations-Galvanometer
L Luftinduktivität
V Gleichspannungsverstärker
KO Kathodenstrahl-Oszillograph

verstärker ist so ausgelegt, daß der Verstärkungsfaktor V für Spannungen mit einer Frequenz zwischen Null und 10 000 Hz praktisch konstant ist.

Da die Glimmentladung mit einer wesentlich höheren Frequenz — wenn man bei den einzelnen Glimmspitzen von Frequenzen reden darf — vor sich geht, wird der Glimmstrom mit seiner Frequenz von etwa 5000 Hz durch die Luftinduktivität L gemäß $u_L = i\omega L$ oder $u_L = L\,di/dt$ gegenüber der Grundwelle 50 Hz etwa 100fach „vorverstärkt". Die Induktivität L zieht also die Glimmspitzen aus der 50 Hz-Stromkurve heraus.*) Durch geeignete Dimensionierung von L läßt sich sogar erreichen, daß praktisch nur die Glimmspitzen angezeigt werden und die Grundfrequenz des Ladestromes unterdrückt wird. Wie wirksam diese empfindliche Glimmanzeige bei Verwendung einer kleinen Luftdrossel ist, geht anschaulich aus Bild 2 hervor.

Die Oszillogramme Bild 3 zeigen deutlich die Empfindlichkeitssteigerung durch die Drosselvorschaltung. Die Bilder der linken Spalte zeigen die Stromkurve als Spannungsabfall an einem ohmschen Widerstand; aus den beiden oberen Bildern läßt sich mit gutem Willen ein Glimmen im Spannungsmaximum nur „erahnen", und im unteren Bild ist aus der verzerrten Spannungskurve zu entnehmen, daß das Prüfobjekt glimmt. Die Bilder in der Mitte sind unter sonst gleichen Bedingungen mit einer Luftdrossel L aufgenommen worden, das Glimmen im Spannungsmaximum ist stark hervorgehoben. An der Breite der Glimmzone ist zu ersehen, daß die Glimmanfangsspannung weit überschritten worden ist, und zwar in der oberen Reihe um 23%, in der Mitte um 32% und in der unteren Reihe um 43%, wie sich aus Messungen der Glimmanfangsspannung nach der angegebenen Methode ergab. Bei den Bildern rechts wurde mit L ein ohmscher Widerstand in Reihe geschaltet, um die Grundwelle hervortreten zu lassen; auch hier ist das Glimmen gut angezeigt. Der Einheitlichkeit halber sind übrigens in diesen Bildern die Scheitelwerte der Spannungskurven zeitlich zur Deckung gebracht worden.

Soll die Glimmanfangsspannung an Prüfobjekten mit größerem Ladestrom bestimmt werden, so kann die Meßanordnung in der Scheringbrücke angewendet werden (Bild 4). Mit Hilfe der Scheringbrücke wird gemäß $C_x = C_n \cdot R_2/R_4$ der Ladestrom und gemäß $\operatorname{tg} x = \omega R_2 C_2$ die Grundwelle des Verluststromes kompensiert. Übrig bleiben der Glimmstrom und die Verlustströme der verschiedenen Oberwellen der angelegten Spannung. Durch Abstimmung von L und R kann erreicht werden, daß die hochfrequenten Glimmströme an L den Spannungsabfall erzeugen und die Oberwellen der angelegten Spannung an R auftreten. u_L wird wie in Bild 1 durch den Gleichspannungsverstärker sichtbar gemacht, der bei dieser Meßanordnung allerdings einen symmetrischen Eingang haben muß, wenn man nicht durch Anwendung des Wagnerschen Hilfszweiges künstlich einen Punkt der Brücke auf Erdpotential legen will.

Die angegebene Meßmethode hat nicht nur den Vorteil, daß wirklich das erste Glimmen angezeigt wird, sondern aus dem verschiedenartigen Aussehen der Glimmentladungen lassen sich Rückschlüsse auf die Beschaffenheit des Dielektrikums ziehen. Dieses soll an drei charakteristischen Beispielen gezeigt werden.

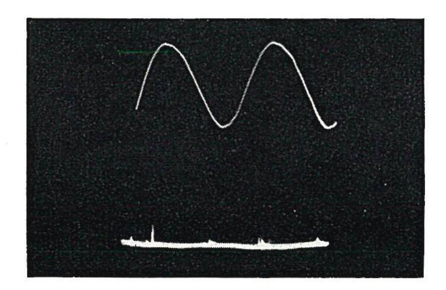
Glimmen an einem Kondensator in Luft

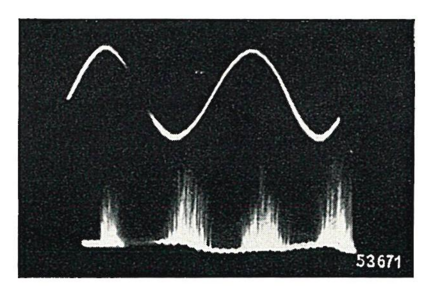
Bild 5 zeigt die Glimmerscheinung an einem Kondensator in Luft in drei verschiedenen Stadien, und zwar a den Glimmeinsatz, b und c Glimmen bei gesteigerter Spannung. Wegen des geringen Energieumsatzes tritt das erste Glimmen in Form ganz feiner Zacken auf, meistens zu gleicher Zeit in der positiven und negativen Halbwelle. Jedoch tritt nicht eine einzelne Spitze auf, sondern sofort eine kleine Glimmzone. Bei steigender Spannung wächst die Glimmzone in Breite und Höhe rasch an; in der positiven Halbwelle sind die Glimmentladungen entschieden länger. Vergleicht man hiermit ein Photogramm, das von der Streifenentladung an einer Gleitanordnung bei negativer und positiver Stoßspannung aufgenommen wurde, so ergibt sich ein ähnliches Bild (Bild 6). Die sichtbare Entladung bei positiver Stoßspannung ist wesentlich länger als bei gleicher negativer Stoßspannung. Hier zeigt sich der Einfluß der Polarität.

Glimmen eines Kondensators ohne Lufteinschlüsse in evakuiertem Öl

Bild 7a zeigt den Glimmeinsatz. Das erste Glimmen erscheint immer als einzelstehende kleine Zacke. Die Ionisation bleibt also wegen der großen Durchschlagsfestigkeit des Öles sehr beschränkt. Diese erste Spitze tritt auch nicht in jeder Halbwelle auf, sondern setzt zeitweise aus. Steigert man die anliegende Spannung, so wird gemäß Bild 7b die Zacke länger und bleibt stehen; d. h. die Entladung ist energiereicher, und der Durchbruch tritt in jeder Halbwelle auf. Steigert man die Spannung weiterhin (Bild 7c), so

*) Die Glimmspitzen werden in den Oszillogrammen in beiden Polaritäten in einer Richtung angezeigt. Dies ist auf eine Eigenart des verwendeten Gleichspannungsverstärkers zurückzuführen.





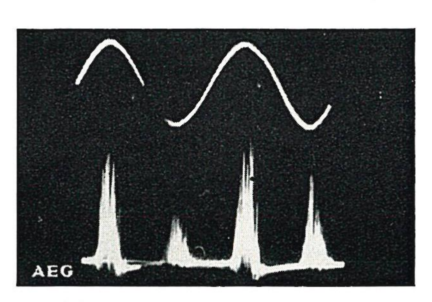


Bild 2. Glimmanzeige, bei der die Grundfrequenz des Ladestromes nicht angezeigt wird

a b c

Bild 3. Glimmanzeige, aufgenommen a) mit ohmschem Widerstand b) mit Luftdrossel c) mit Luftdrossel und ohmschem Widerstand

a b c

Bild 5. Glimmen eines Kondensators in Luft

a b

Bild 6. Photogramme der Streifenentladung bei gleicher positiver (a) und negativer (b) Stoßspannung

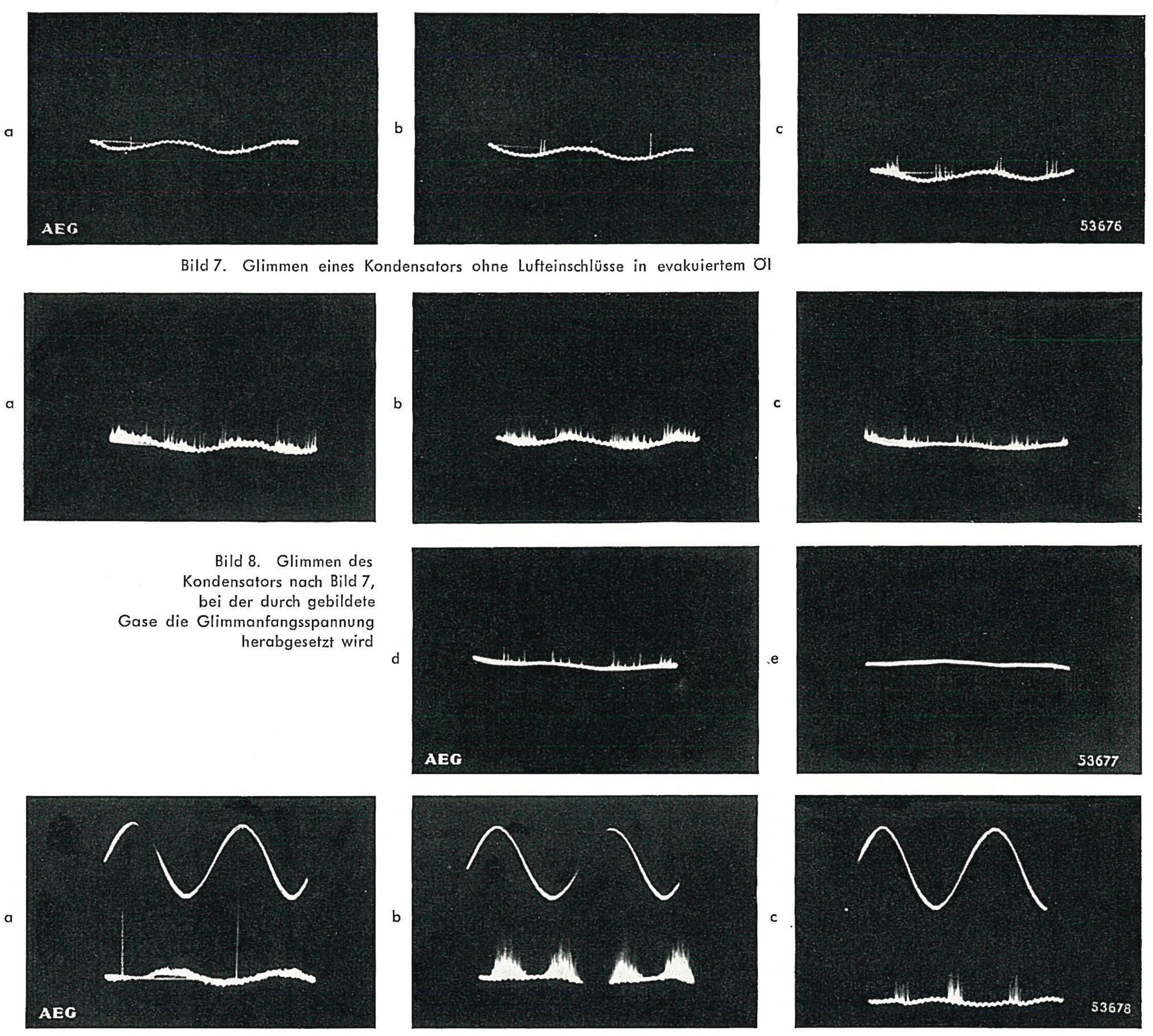


Bild 7. Glimmen eines Kondensators ohne Lufteinschlüsse in evakuiertem Öl

Bild 8. Glimmen des Kondensators nach Bild 7, bei der durch gebildete Gase die Glimmanfangsspannung herabgesetzt wird

Bild 9. Glimmerscheinungen an einem Kondensator unter Öl mit Lufteinschlüssen

treten nebeneinander viele Zacken auf, ein Zeichen dafür, daß die Glimmanfangsspannung wesentlich überschritten wurde. Bei diesem Ionisationsgrad bilden sich schnell Gase infolge der Zerstörung von Ölmolekülen an den Rändern der Beläge. Diese Gase setzen die Glimmanfangsspannung wesentlich herab, und zwar schließlich bis zu der Spannung, bei welcher der Kondensator in Luft zu glimmen anfangen würde. Bild 8 zeigt dafür ein Beispiel.

Der Kondensator lag eine Stunde an 9,7 kV_{max} (das ist die gleiche Beanspruchung wie bei Bild 7c). Nach dieser Beanspruchungsdauer erhielt man eine Glimmanzeige gemäß Bild 8a. Mit sinkender Spannung ergaben sich die Bilder 8b, c, d und e. Die Glimmanfangsspannung war durch die gebildeten Gase auf 1 kV_{max} herabgesetzt worden.

Aus dem Vorausgehenden ist zu ersehen, wie wichtig die exakte Bestimmung der Glimmanfangsspannung unter Öl ist; denn hat die Gasentwicklung einmal begonnen, so setzt sie sich auch bei weit niedrigeren Spannungen fort, und es kommt im Laufe der Zeit zuverlässig zum Durchschlag.

Kondensator mit Lufteinschlüssen unter Öl

Ist der Kondensator nicht gut evakuiert oder haften an den Belagrändern kleine Luftbläschen an, so tritt dieser Fehler deutlich in Erscheinung (Bild 9).

Bei der Glimmeinsatzspannung tritt sofort eine heftige Ionisation ein, so daß eine Zacke hoher Amplitude aufgezeigt wird (Bild 9a). Bei sehr schlechter Evakuierung tritt die Glimmanfangsspannung sofort in der Art wie bei 9b oder 9c auf, so daß bei einiger Übung dieser Entladecharakter nicht zu übersehen ist und aus der Art des Glimmeinsatzes Schlüsse auf die Güte der Tränkung und Evakuierung zu ziehen sind.

Mit der beschriebenen Meßanordnung, welche wegen ihrer hohen Empfindlichkeit wirksame Abschirmungen erfordert, sind die ersten Ionisationsvorgänge in Luft oder Öl deutlich zu erfassen. Die Methode kann auch zur Messung der Koronaanfangsspannung an Leitungen oder bei physikalischen Untersuchungen über den Glimmeinsatz an einer Anordnung, z. B. Spitze-Platte, mit Erfolg angewendet werden.

BESTIMMUNG DER LEERLAUFKENNLINIE AN LEISTUNGSSCHALTERN

Wolfgang Herbst

DK 621.317.612:621.316.54.026.44

Leistungsschalter in Hochspannungsnetzen müssen nicht nur der Abschaltung großer, praktisch rein induktiver Ströme gewachsen sein, sondern auch beim Schalten kleiner Ströme, seien es Ladeströme leerlaufender Leitungen oder Magnetisierungsströme von Transformatoren, eine einwandfreie Netztrennung gewährleisten. Ein wichtiges Kennzeichen für die Eignung des Schalters für solche Beanspruchungen ist die sogenannte Leerlaufkennlinie des Schalters[1]). Sie zeigt den Verlauf der Spannungsfestigkeit der Schaltstrecke eines Leistungsschalters während der Öffnung in Abhängigkeit von der Zeit bei verschwindend kleinem Strom. Diese Leerlaufkennlinie kann mit einer Prüfschaltung gewonnen werden, bei der auf dem Oszillographenschirm Kurven erscheinen, die wegen ihrer charakteristischen Form „Sägezahnkurven" genannt werden (Bild 1). Diese Methode wurde 1938 erstmalig bei der AEG von C. Rabus für Mittelspannungsschalter angewandt.

Die prinzipielle Schaltung zur Aufnahme von Sägezahnkurven zeigt Bild 2, wobei der Schalter durch eine Kugelfunkenstrecke K ersetzt wurde, um die folgenden Betrachtungen zu vereinfachen. C_1 ist eine sehr große, auf die Spannung E aufgeladene Kapazität.

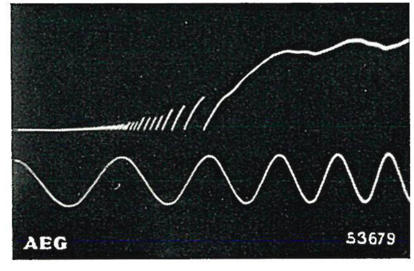


Bild 1. Sägezahnkurve mit 50 Hz-Zeiteichung. Aufgenommen an einem 220 kV-AEG-Freistrahlschalter

Die nach einer exponentiellen Kurve ansteigende Spannung an C_2 und C_3 bei vernachlässigbar kleinem R_2 ist

$$e_{c\,2,3} = E\left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}}\right) \quad (1)$$

mit der Zeitkonstanten

$$T_1 = R_1\,(C_2 + C_3). \quad (2)$$

Sie erreicht nach der Ladezeit

$$\tau = R_1\,(C_2 + C_3)\cdot \ln \frac{1}{1 - e_z/E} \quad (3)$$

die an der Kugelfunkenstrecke eingestellte Zündspannung

$$e_z = E\left(1 - e^{-\frac{\tau}{R_1\,(C_2+C_3)}}\right). \quad (4)$$

Nach dem Überschlag entlädt sich die Kapazität C_3 über den Widerstand R_2, wobei der Spannungsverlauf durch die Gleichung

$$e_{c\,3} = e_z\, e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (5)$$

mit der Zeitkonstanten

$$T_2 = R_2 \cdot C_3 \quad (6)$$

bestimmt ist.

Bild 3 zeigt die graphische Darstellung des Spannungsverlaufes. Infolge der äußerst kleinen Zeitkonstante T_2 in der Größenordnung von 10^{-9} s ist die exponentielle Charakteristik des Spannungszusammenbruches in Wirklichkeit nicht zu erkennen.

Wird nun die Kugelfunkenstrecke K durch einen Schalter ersetzt, so tritt an die Stelle der konstanten Zündspannung der Kugelfunkenstrecke die mit der Zeit wachsende Zündspannung der Schaltstrecke. Die Spannungszusammenbrüche erfolgen daher bei steigenden Werten dieser Zündspannung, und es ergibt sich der Spannungsverlauf nach Bild 4. Die durch Verbinden der einzelnen Zündspannungen e_z erhaltene Kurve wird als die Leerlaufkennlinie des Schalters bezeichnet.

Die gesamte Prüfschaltung für die Aufnahme der Leerlaufkennlinie ist in Bild 5 dargestellt. Sie enthält folgende wesentliche Teile:

- Gleichspannungserzeuger,
- Hochohmwiderstand,
- Prüfobjekt und Eichfunkenstrecke,
- Spannungsteiler,
- Anschluß für den Kathodenstrahl-Oszillographen.

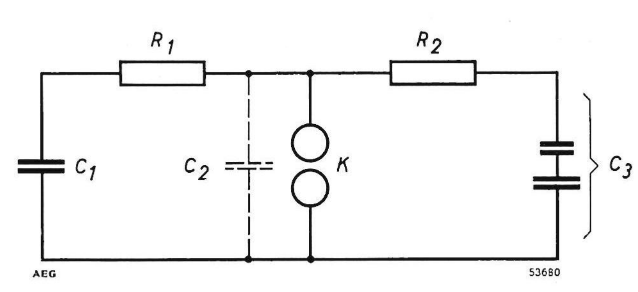


Bild 2. Prinzipielle Schaltung zur Bestimmung der Leerlaufkennlinie

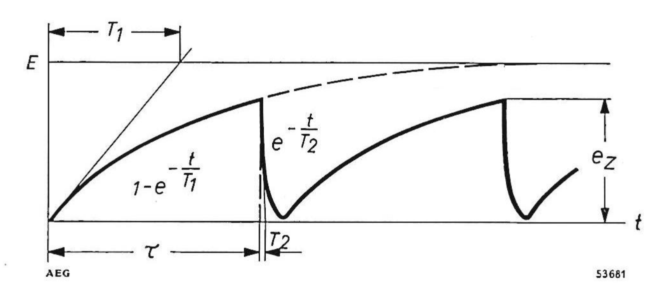


Bild 3. Spannungsverlauf an der Kugelfunkenstrecke

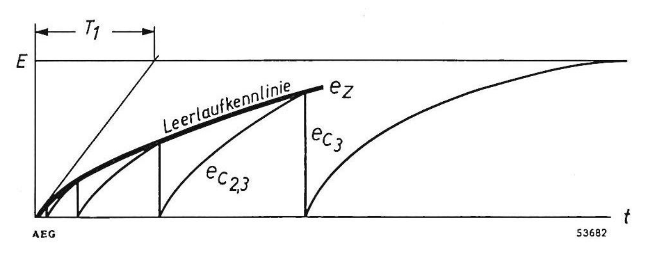


Bild 4. Leerlaufkennlinie eines Schalters

Bild 6. Hochohmwiderstand

Besondere Sorgfalt muß bei der Auswahl des Hochohmwiderstandes angewendet werden. Einmal muß sein Widerstandswert so groß sein, daß die Kondensatorbatterie C_1 beim Versuch nur langsam entladen wird, da keine Nachladung durch den Transformator mehr erfolgt. Zum anderen sollen die Sägezahnkurven möglichst alle Einzelheiten der Spannungsverfestigung der Schaltstrecke wiedergeben, d. h. die Zeitkonstante T_1 des Aufladevorganges und mit ihr der Ohmwert des Hochohmwiderstandes sollen klein sein. Mit Rücksicht auf ein schnelles Variieren des Ohmwertes fiel die Wahl auf einen Wasserwiderstand (Bild 6), der sich im Laufe der Zeit ausgezeichnet bewährt hat. Dieser besteht aus zwanzig V-förmig gebogenen Glasröhren, die durch kurze Gummischläuche hintereinander geschaltet sind. Ein oberhalb des Widerstandes befindlicher Glasbehälter nimmt das richtig gemischte Wasser auf. Von hier läuft es durch

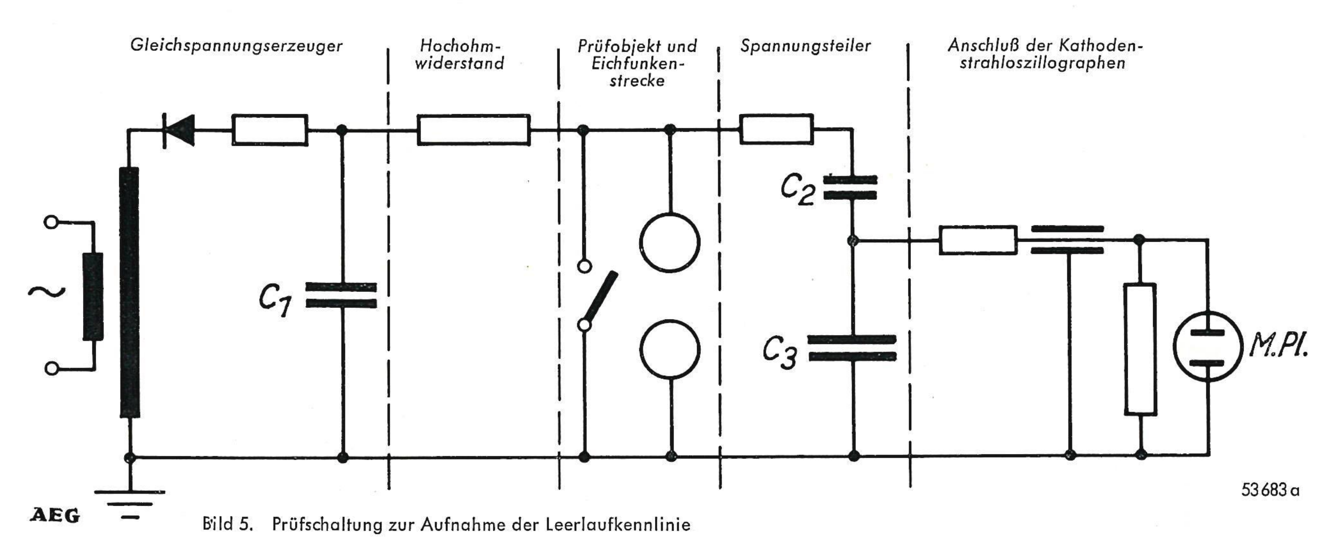


Bild 5. Prüfschaltung zur Aufnahme der Leerlaufkennlinie

Bild 7. Aufnahme der Leerlaufkennlinie an einem 60 kV-AEG-Freistrahlschalter. Versuchsaufbau.
Im Bilde von links nach rechts: Eichfunkenstrecke, AEG-Freistrahlschalter, kapazitiver Spannungsteiler
Im Hintergrund:
Selengleichrichter (500 kV), davor Wasserwiderstand und Kathodenstrahloszillograph sowie rechts Kondensatorenbatterie

die Glasröhren. Ein Ablaßhahn am Ende der Wassersäule schließt sie ab und ermöglicht es, beim Versuch gegebenenfalls stark erwärmtes Wasser schnell abfließen zu lassen. Mit destilliertem Wasser von 10 Mikrosiemens je cm kann bei einer Wassersäule von 6 mm Durchmesser und 20 m Länge ein Widerstandswert von rund $7 \cdot 10^8$ Ohm erreicht werden.

Bild 7 zeigt die Versuchsanordnung und als Prüfobjekt einen AEG-Freistrahl-Druckgasschalter (60 kV), der unter den verschiedensten Bedingungen geschaltet wurde.

Zur Spannungseichung eignet sich am besten eine Kugelfunkenstrecke. Durch die rasche Zündfolge können Fehler bis zu 30% entstehen, da die Luft zwischen den Kugeln sehr stark ionisiert wird. Sie setzt der ansteigenden Spannung nicht mehr jene Festigkeit entgegen, die nötig ist, um eine einwandfreie Eichung zu gewährleisten. Durch den jeweiligen Ionisationsgrad bedingt, ist die Höhe der Sägezähne stark unterschiedlich (Bild 8a). Um diesem Übelstand abzuhelfen, wird die Überschlagzone der Kugelfunkenstrecke durch mäßige Beblasung mit Druckluft so intensiv gereinigt, daß praktisch immer die gleiche und zugleich richtige Spannungshöhe garantiert ist (Bild 8b).

Um auch bei sehr hohen Spannungen die Vorgänge mit einem Kathodenstrahl-Oszillographen aufnehmen zu können, ist ein Spannungsteiler erforderlich. Prinzipiell kommt nur ein kapazitiver Teiler in Frage, der die Spannungsänderungen bei den Sägezahnversuchen mit der verlangten Genauigkeit ohne weiteres wiedergibt. Dabei ist zu beachten, daß die Niederspannungs-

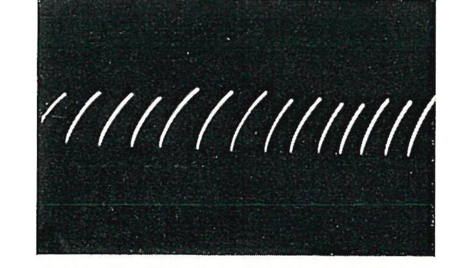
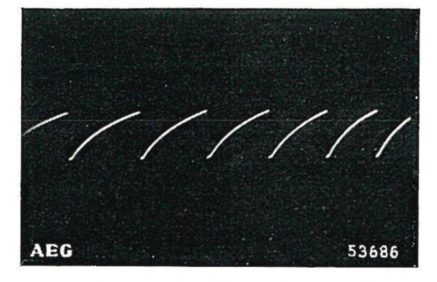


Bild 8.
Spannungseichung mit der Kugelfunkenstrecke
a) Nicht beblasene Kugelfunkenstrecke



b) Beblasene Kugelfunkenstrecke

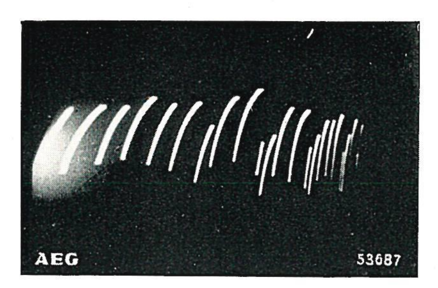


Bild 9. Springen der Sägezähne

elektrode des Hochspannungskondensators sowie der Niederspannungskondensator gegen äußere Streufelder einwandfrei abgeschirmt sind.

Bei Versuchen mit Spannungen über 100 kV tritt oftmals ein Springen der Sägezähne ein, d. h. die Nulllinie des Oszillogramms verändert laufend ihre Lage (Bild 9). Die Störung entsteht durch das unterschiedliche Abreißen des Lichtbogens an der Funkenstrecke zusammen mit der Eigenschwingung des Meßpotentiometers. Sie läßt sich beseitigen, wenn dieser Kreis entsprechend gedämpft wird.

Die am Niederspannungskondensator C_3 entstehende Meßspannung wird den Meßplatten des Hochleistungs-Kathodenstrahl-Oszillographen zugeführt. Dies geschieht mit einem kurzen, abgeschirmten und kapazitätsarmen Kabel, in dessen Anfang ein Dämpfungswiderstand eingefügt ist, um Wanderwellenschwingungen der Leitung zu unterdrücken. Ein Widerstand parallel zu den Meßplatten dient zur Ableitung unerwünschter Aufladungen.

Die Zeitablenkung ist nach Bild 10 aufgebaut. Mit Hilfe einer Gleichrichterschaltung wird der Kondensator C_1 über den Schutzwiderstand R_2 mit einer Gleichspannung aufgeladen, die durch das Potentiometer R_1 in ihrer Höhe verändert werden kann, was gleichzeitig ein stufenloses Regeln der Zeitablenkung in weiten Grenzen bedeutet. Ein Druck auf die Taste S_1 löst eine Schaltwalze aus. Daraufhin öffnet als erstes der Erdungsschalter S_4. Im weiteren Verlauf schließt die Schaltwalze die Schalter S_2 und S_3. Dadurch wird einmal der Kondensator C_2 über R_3 aufgeladen und zum anderen der Ausschaltspule des zu prüfenden Schalters die Betätigungsspannung zugeführt. Der Schalteinsatz der beiden Schalter S_2 und S_3 muß so gewählt werden, daß das Oszillogramm mit einem kurzen Nullstrich beginnt, bevor die Sägezahnkurve erscheint. Eine Vorablenkspannung sorgt dafür, daß der Leuchtfleck vor der Messung so weit nach links geschoben wird, daß er nicht mehr auf dem Bildschirm sichtbar ist.

Literatur

1) A. Hochrainer: Die Spannungskennlinien des Leistungsschalters, VDE Fachberichte (1953) II, S. 27—31, 10 B

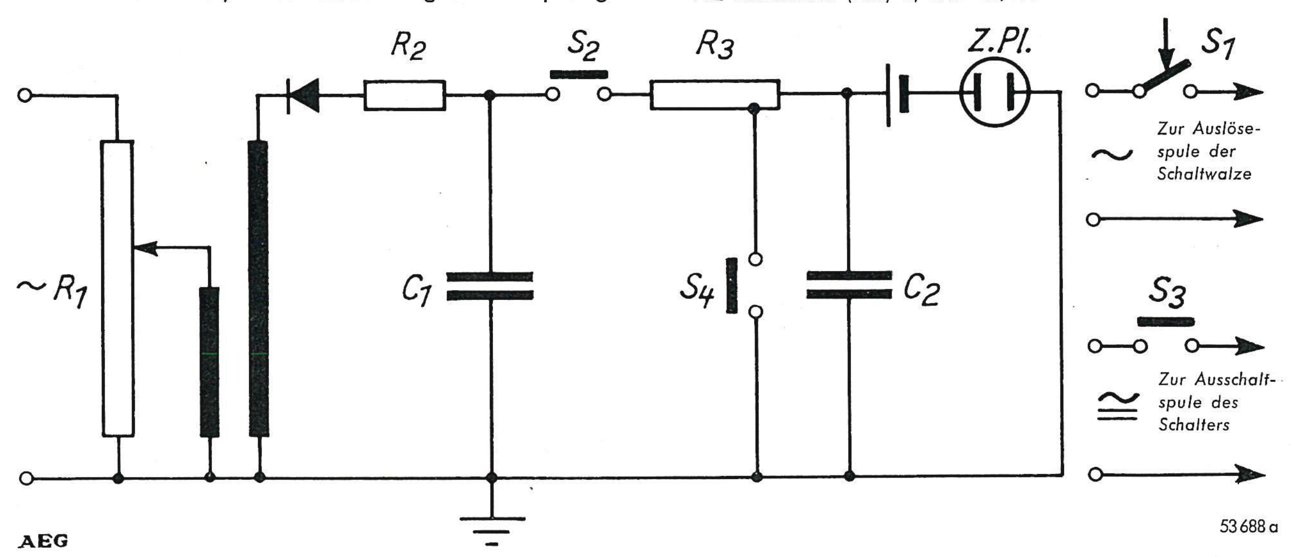


Bild 10. Zeitablenkung für die Aufnahme der Leerlaufkennlinie

ÜBER FELDER MIT NICHTKONSTANTER MATERIALKONSTANTE

August Hochrainer

DK 621.319.7

Unter dem elektrostatischen Feld, dem wichtigsten Begriff der Hochspannungstechnik, versteht man das elektrische Kraftfeld, das von elektrischen Ladungen ausgeht. Es wird durch den Vektor der elektrischen Feldstärke beschrieben, der üblicherweise mit $\mathfrak{E}$ oder in analytischer Schreibweise[1]) mit E_i bezeichnet wird. Im elektrostatischen Feld ist dieser Vektor wirbelfrei, während im allgemeinen elektrischen Feld seine Wirbeldichte durch die Maxwellschen Gleichungen vorgeschrieben ist. Man nimmt ferner die Existenz eines zweiten Vektors, den der dielektrischen Verschiebung, an, der mit $\mathfrak{D}$ oder D_i bezeichnet wird. Die elektrischen Ladungen sind die Quellen von D_i. Der Zusammenhang zwischen E_i und D_i ist durch die Beziehung

$$\varepsilon E_i = D_i \qquad (1)$$

bestimmt, wobei ε die Dielektrizitätskonstante ist. ε hängt von der das Feld erfüllenden Materie ab, ist

also eine Materialkonstante. Ist diese tatsächlich konstant, dann läßt sich die Behandlung des elektrostatischen Feldes auf die Theorie der einfachen Vektorfelder zurückführen. Im elektrostatischen Feld ist E_i wirbelfrei, d.h. es besteht eine skalare Ortsfunktion U, die man das Potential nennt, so daß

$$E_i = -\frac{\partial U}{\partial x_i} \qquad (2)$$

oder in symbolischer Schreibweise

$$\mathfrak{E} = -\operatorname{grad} U.$$

Ferner ist, wenn q die Dichte der elektrischen Ladungen dargestellt,

$$\frac{\partial D_i}{\partial x_i} = q \text{ bzw. } \operatorname{div} \mathfrak{D} = q \qquad (3)$$

Aus (1), (2) und (3) folgt

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(-\varepsilon \frac{\partial U}{\partial x_i}\right) = q \text{ oder } \operatorname{div}(-\varepsilon \operatorname{grad} U) = q \qquad (4)$$

Ist ε eine Konstante, dann verbleibt

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x_i \partial x_i} = -\frac{q}{\varepsilon} \qquad (5)$$

oder

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} U = -\frac{q}{\varepsilon}$$

oder mit

$$\frac{q}{\varepsilon} = \gamma \qquad (6)$$

$$\boxed{\triangle U = -\gamma}, \qquad (7)$$

die Poissonsche Differentialgleichung. Sind keine Ladungen im Feld vorhanden, verschwindet also γ, dann verbleibt

$$\boxed{\triangle U = 0}, \qquad (8)$$

die Laplacesche Differentialgleichung. Auf dieser baut sich die Theorie der einfachen Vektorfelder auf, und aus ihr leiten sich die Sätze über die Eindeutigkeit des Feldes bei vorgegebenen Randwerten von U oder der Normalkomponenten von E_i her. Zu den wichtigsten Sätzen zählt jener, welcher behauptet, daß das Feld in einem abgeschlossenen Gebiet verschwindet, wenn im Inneren keine Quellen und Wirbel vorhanden sind und das Potential am Rand einen konstanten Wert hat.

Diese Zurückführung des durch das Vektorpaar E_i und D_i beschriebenen elektrostatischen Feldes auf ein einfaches Vektorfeld versagt aber, wenn die Dielektrizitätskonstante innerhalb des betrachteten Gebietes nicht mehr konstant ist, sondern selbst eine Ortsfunktion darstellt. In der praktischen Hochspannungstechnik kommen solche Fälle sehr häufig vor, weil man zur Erhöhung der elektrischen Festigkeit die Leiter mit Isolierstoffen umgibt, die verbleibenden Zwischenräume mit Öl oder anderen Flüssigkeiten füllt usw. Man hilft sich dann bei den theoretischen Untersuchungen so, daß man das Feld in einzelne Schichten, in denen ε eine Konstante ist, zerlegt denkt, und stellt dann bestimmte Bedingungen für den Übergang von einer Schicht zur nächsten auf. Es ist aber interessant und wichtig, einmal den Fall zu betrachten, daß ε vollständig willkürlich verteilt ist. Man kommt dann zur Aufstellung einer Theorie der vektoriellen Doppelfelder mit „nichtkonstanter" Materialkonstante. Solche Doppelfelder treten nicht nur in der Elektrostatik auf; wir finden ähnliche Doppelfelder im elektrischen Strömungsfeld mit den Vektoren der Stromdichte und der Feldstärke, die durch den spezifischen Widerstand verbunden sind, ferner im magnetischen Feld mit den Vektoren der Induktion und der magnetischen Feldstärke, verbunden durch die Permeabilität, und schließlich im Feld der Wärmeleitung, mit den Vektoren des Temperaturgradienten und der Wärmestromdichte, verbunden durch die Wärmeleitfähigkeit. In allen diesen Fällen haben wir in demselben Gebiet zwei Vektorfelder vor uns, von denen wir das eine als das A-Feld, das andere als das B-Feld bezeichnen wollen, entsprechend den Feldvektoren A_i und B_i. Diese beiden Felder sind durch den Feldfaktor λ verbunden, so daß

$$B_i = \lambda A_i . \qquad (9)$$

Vom Feldfaktor nehmen wir an, daß er durch eine skalare Ortsfunktion

$$\lambda = \lambda(x_1, x_2, x_3) \qquad (10)$$

gegeben ist. Noch allgemeiner ist der Fall, wo an Stelle des skalaren Feldfaktors ein Tensor zweiter Stufe tritt, wie z. B. in Kristallen, doch wollen wir uns hier auf den Fall des skalaren Feldfaktors beschränken.

Für die Bezeichnungen verwenden wir folgendes Schema

	A-Feld	B-Feld
Feldvektor	A_i	B_i
Divergenz	$a = \frac{\partial A_i}{\partial x_i}$	$b = \frac{\partial B_i}{\partial x_i}$
Rotor*)	$\alpha_i = \varepsilon_{ijk} \frac{\partial A_k}{\partial x_j}$	$\beta_i = \varepsilon_{ijk} \frac{\partial B_k}{\partial x_j}$

Aus der Betrachtung der oben erwähnten physikalischen Doppelfelder erkennen wir, daß gewöhnlich Angaben über die Wirbel des einen Feldes und über die Quellen des anderen Feldes vorliegen. Aus (9) folgt

$$\beta_i = \varepsilon_{ijk} \frac{\partial B_k}{\partial x_j} = \lambda\, \varepsilon_{ijk} \frac{\partial A_k}{\partial x_j} + A_k\, \varepsilon_{ijk} \frac{\partial \lambda}{\partial x_j}$$

und mit

$$\Lambda_i = \frac{\partial \lambda}{\partial x_i}, \qquad (11)$$

dem Gradienten des Feldfaktors, schließlich

$$\beta_i = \lambda \alpha_i + \varepsilon_{ijk} \Lambda_j A_k \qquad (12)$$

Man erkennt daraus, daß zu einem wirbelfreien A-Feld ($\alpha_i = 0$) im allgemeinen ein Wirbelfeld als B-Feld gehört. Eine Ausnahme tritt nur ein, wenn Λ_i parallel zu A_i ist, d. h. wenn A_i an jeder Stelle senkrecht auf den Niveauflächen des Feldfaktors steht.

*) ε_{ijk} ist der sogenannte ε-Tensor, das ist ein alternierender Tensor 3. Stufe, für den gilt

$\varepsilon_{ijk} = 0$ für zwei beliebige gleiche Indizes,

$\varepsilon_{ijk} = +1$ für lauter verschiedene Indizes in gerader Permutation,

$\varepsilon_{ijk} = -1$ für lauter verschiedene Indizes in ungerader Permutation.

Der ε-Tensor ermöglicht die korrekte Darstellung des äußeren Produkts und hat natürlich mit der Dielektrizitätskonstante nichts zu tun.

Dieser Ausnahmefall liegt z. B. vor, wenn in einem Plattenkondensator die Trennungsflächen der verschiedenen Materialien parallel zur Ebene der Platten verlaufen.

Für die Divergenz erhalten wir aus (9):

$$b = \frac{\partial B_i}{\partial x_i} = \lambda \frac{\partial A_i}{\partial x_i} + A_i \frac{\partial \lambda}{\partial x_i}$$

oder

$$b = \lambda a + A_i \Lambda_i \,. \tag{13}$$

Ist das A-Feld quellenfrei, so ist es im allgemeinen das B-Feld nicht. Eine Ausnahme tritt nur dann ein, wenn der Feldvektor A_i die Niveauflächen des Feldfaktors berührt.

Die wichtigste Frage für die Theorie ist, ob ein Doppelfeld durch die Angabe der Wirbel des einen Feldes und der Quellen des anderen Feldes und gegebenenfalls durch entsprechende Randbedingungen eindeutig bestimmt ist. Wir beschränken uns hier auf den Fall des wirbel- und quellenfreien Doppelfeldes, d. h. wir nehmen an, daß das A-Feld wirbelfrei ist, also

$$\alpha_i = 0 \tag{14}$$

und daß das B-Feld quellenfrei ist, also daß

$$b = 0 \tag{15}$$

gilt. Dann hat das A-Feld ein Potential U, und es ist

$$A_i = \frac{\partial U}{\partial x_i}, \tag{16}$$

dann ist

$$b = \frac{\partial B_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \lambda A_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda \frac{\partial U}{\partial x_i}\right) \tag{17}$$

und wegen (15)

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda \frac{\partial U}{\partial x_i}\right) = 0 \tag{18}$$

oder

$$\boxed{\frac{\partial^2 U}{\partial x_i\, \partial x_i} + \frac{\partial U}{\partial x_i} \frac{\partial \lambda}{\partial x_i} = 0} \tag{19}$$

Jede Lösung dieser Differentialgleichung stellt das Potential des A-Feldes eines wirbel- und quellenfreien Doppelfeldes dar.

Die Theorie der einfachen Vektorfelder baut sich vollständig auf der Laplace- und der Poissonschen Differentialgleichung und den speziellen Eigenschaften der Lösungen dieser Differentialgleichungen auf. Insbesondere setzen alle Beweise über die Eindeutigkeit der Lösungen, die Lösungsverfahren bei bestimmten Randbedingungen usw. stets die Gültigkeit der Laplaceschen Gleichung voraus. Da nun, wie (19) zeigt, die grundlegende Differentialgleichung für die Doppelfelder eine andere Form hat, bedarf es einer besonderen Untersuchung darüber, welche der von den einfachen Feldern gewonnenen Vorstellungen auch bei den Doppelfeldern anwendbar sind. Die Untersuchung zeigt, daß viele Eigenschaften bestehen bleiben, während in anderen Fällen Abweichungen eintreten, die natürlich insofern Verallgemeinerungen darstellen, als sie für den Fall λ = konst zur Übereinstimmung mit den einfachen Feldern führen müssen. Eine eingehende Behandlung dieser Fragen wird an einer anderen Stelle erfolgen. Hier wollen wir nur noch zeigen, daß auch das Doppelfeld verschwindet, wenn U überall an der Begrenzung des betrachteten Raumgebietes $\mathfrak{R}$ eines wirbel- und quellenfreien Doppelfeldes verschwindet.

In der ersten Greenschen Formel

$$\oint_{\mathfrak{F}} \Phi \frac{\partial \Psi}{\partial x_i} df_i = \int_{\mathfrak{R}} \Phi \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x_i \partial x_i} dV + \int_{\mathfrak{R}} \frac{\partial \Phi}{\partial x_i} \frac{\partial \Psi}{\partial x_i} dV \tag{20}$$

setzen wir $\Phi = \lambda U$ und $\Psi = U$,

so daß

$$\oint_{\mathfrak{F}} \lambda U \frac{\partial U}{\partial x_i} df_i = \int_{\mathfrak{R}} \left[\lambda U \frac{\partial^2 U}{\partial x_i \partial x_i} + \frac{\partial \lambda U}{\partial x_i} \frac{\partial U}{\partial x_i}\right] dV =$$

$$= \int_{\mathfrak{R}} \frac{\partial}{\partial x_i}\left[\lambda U \frac{\partial U}{\partial x_i}\right] dV$$

oder

$$\oint_{\mathfrak{F}} \lambda U \frac{\partial U}{\partial x_i} df_i = \int_{\mathfrak{R}} U \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda \frac{\partial U}{\partial x_i}\right) dV + \int_{\mathfrak{R}} \lambda \frac{\partial U}{\partial x_i} \frac{\partial U}{\partial x_i} dV \tag{21}$$

wird.

Die linke Seite von (21) verschwindet wegen U = 0 auf $\mathfrak{F}$. Das erste Integral rechts verschwindet wegen (18), und es bleibt

$$\int_{\mathfrak{R}} \lambda A_i A_i dV = 0 \,. \tag{22}$$

Wenn $\lambda \geqq 0$ ist, was wir stets annehmen, dann folgt aus (22), daß A_i im ganzen Bereich $\mathfrak{R}$ verschwindet. Wir bemerken noch, daß das auch gilt, wenn auf $\mathfrak{F}$ nicht U, sondern die Normalkomponente von A_i verschwindet, denn dann verschwindet auch $\partial U/\partial x_i$ überall auf $\mathfrak{F}$.

Es gilt somit auch für das wirbel- und quellenfreie Doppelfeld, daß der ganze betrachtete Raum feldfrei ist, wenn an seiner Berandung entweder das Potential U des A-Feldes oder die Normal-Komponente des Feldes verschwinden. Da das Hinzufügen eines konstanten Betrages zu U keinen Beitrag zu dem Feldvektor liefert, so gilt die obige Behauptung auch noch, wenn U auf $\mathfrak{F}$ einen überall konstanten Wert aufweist.

Wir können in ähnlicher Weise, wie dies bei der entsprechenden Beweisführung für einfache Vektorfelder geschieht, den oben hergeleiteten Satz für ein allseits ins Unendliche reichendes Doppelfeld erweitern.

Wir denken uns dazu die geschlossene Fläche $\mathfrak{F}$ in eine Kugel $\mathfrak{K}$ mit dem Radius R, deren Mittelpunkt im Inneren von $\mathfrak{F}$ liegt, eingeschlossen. Für den Bereich $\mathfrak{R}$ zwischen $\mathfrak{F}$ und der Kugel gilt dann nach (20)

$$\oint_{\mathfrak{F}} \lambda U A_i df_i + \int_{\mathfrak{K}} \lambda U A_i df_i = \int_{\mathfrak{R}} \lambda A_i A_i dV. \tag{23}$$

Das erste Integral verschwindet wegen U = 0, oder $A_i df_i = 0$. Wir nehmen nun an, daß sich die Funktion U längs jeder durch den Mittelpunkt von $\mathfrak{R}$ gehenden Geraden durch eine Potenzreihe in 1/R in der Gestalt

$$U = \frac{1}{R^n} \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{a_\nu}{R^\nu} \tag{24}$$

darstellen läßt. Dabei sind die a_ν unabhängig von R,

hängen aber von der Richtung der Geraden ab. Es ist dann

$$\frac{dU}{dR} = -\frac{1}{R^{n+1}} \sum \frac{a_\nu(n+\nu)}{R^\nu} \qquad (25)$$

Wir nehmen ferner an, daß sich der Feldfaktor ebenfalls durch eine Potenzreihe

$$\lambda = \frac{1}{R^m} \sum \frac{a_\mu}{R^\mu} \qquad (26)$$

darstellen läßt. Drücken wir noch das Flächenelement auf der Kugel $\mathfrak{K}$ durch den Radius und durch das Differential $d\omega$ des Raumwinkels aus, so finden wir schließlich

$$\int_{\mathfrak{K}} \lambda U A_i df_i = -\frac{1}{R^{2n-1+m}} \int \sum \frac{a_\mu}{R^\mu} \sum \frac{a_\sigma}{R^\sigma} \sum \frac{a_\nu(n+\nu)}{R^\nu} d\omega$$

Wächst nun R über alle Grenzen, so reduzieren sich die Potenzreihen unter dem Integral auf konstante Werte, und das Integral verschwindet, wenn

$$2n-1+m > 0$$

oder

$$n > \frac{1-m}{2}. \qquad (27)$$

Diese Bedingung ist um so besser erfüllt, je größer m ist, also je schneller λ abnimmt. (27) bleibt noch erfüllt, wenn m verschwindet, also wenn λ einem konstanten Wert zustrebt. Wir zeigen aber noch, daß (27) immer erfüllt ist, selbst wenn m negative Werte annehmen sollte. Wenden wir den Gaußschen Satz auf den Raum $\mathfrak{R}$ zwischen $\mathfrak{F}$ und der Kugel $\mathfrak{K}$ an, so ist

$$\oint \lambda \frac{\partial U}{\partial x_i} df_i = \int_{\mathfrak{F}} \lambda \frac{\partial U}{\partial x_i} df_i + \int_{\mathfrak{K}} \lambda \frac{\partial U}{\partial x_i} df_i = \int_{\mathfrak{R}} \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda \frac{\partial U}{\partial x_i}\right) dV = 0; \qquad (28)$$

denn in $\mathfrak{R}$ gilt (18). Das Integral über $\mathfrak{F}$ liefert einen festen Wert — K und daher ist

$$\int_{\mathfrak{K}} \lambda \frac{\partial U}{\partial x_i} df_i = K \qquad (29)$$

Setzen wir die Potenzreihen für λ und dU/dR ein, so folgt

$$\frac{1}{R^{n+m-1}} \int \sum \frac{a_\mu}{R^\mu} \sum \frac{a_\nu(n+\nu)}{R^\nu} d\omega = K \qquad (30)$$

Für $R \to \infty$ reduzieren sich die Potenzreihen auf Konstanten, und (30) beweist, daß stets

$$n > 1-m \qquad (31)$$

ist, so daß (27) unabhängig von m immer erfüllt ist. m beeinflußt aber die Größenordnung des Verschwindens von U im Unendlichen. Wenn λ bei wachsender Entfernung zunimmt, so wird dies durch eine stärkere Abnahme von U ausgeglichen. Wenn nun (27) auf alle Fälle gilt, dann verschwindet die linke Seite von (23) bei zunehmendem Radius der Kugel $\mathfrak{K}$ und (23) geht in (22) über, womit also gezeigt ist, daß es kein unendlich ausgedehntes wirbel- und quellenfreies Doppelfeld gibt. Wenn Doppelfelder in gewissen Bereichen wirbel- und quellenfrei sind, dann müssen außerhalb dieses Bereiches Quellen des B-Feldes oder Wirbel des A-Feldes vorhanden sein. Wenn das A-Feld im ganzen unendlichen Raum wirbelfrei ist, dann müssen außerhalb des wirbel- und quellenfreien Bereiches immer Quellen des B-Feldes vorhanden sein, obwohl man nach (13) vermuten könnte, daß auch bei verschwindenden Quellen des B-Feldes felderzeugende A-Quellen allein vorhanden sein könnten. Mit anderen Worten heißt das, daß bei den physikalischen Feldern die bloße Anwesenheit von Materie verschiedener Materialkonstanten nicht genügt, um ein Doppelfeld zu erzeugen.

Die weitere Behandlung des wirbel- und quellenfreien Doppelfeldes zeigt, daß man auch ein solches Doppelfeld durch geeignete Randbedingungen eindeutig bestimmen kann und daß dies auch für das allgemeine Feld gilt, wenn also die Wirbeldichte α_i des A-Feldes und die Quelldichte b des B-Feldes vorgeschrieben sind. Ferner läßt sich zeigen, daß es auch im Doppelfeld möglich ist, das Potential U in einem beliebigen Punkt p_i des Feldes aus den Randwerten von U oder der Normalkomponente von A_i mit Hilfe einer Greenschen Funktion $G(p_i, x_i)$ zu berechnen. Für das wirbel- und quellenfreie Feld gilt z. B. bei gegebenen Randwerten von U die Formel

$$4\pi U(p_i) = \oint_{\mathfrak{F}} \lambda U \frac{\partial G}{\partial x_i} df_i; \qquad (32)$$

dabei ist die Greensche Funktion G jene Potentialverteilung, die bei der vorhandenen Verteilung von λ entsteht, wenn in p_i eine B-Quelle der Ergiebigkeit 4π angeordnet wird und auf $\mathfrak{F}$ das Potential U des A-Feldes verschwindet. Von besonderem Interesse ist es noch, daß diese Greensche Funktion auch bei beliebiger Verteilung von λ symmetrisch in x_i und p_i ist.

Eine wichtige Größe in einem Doppelfeld ist das Verhältnis des Flusses des B-Feldes zwischen zwei auf verschiedenem A-Potential befindlichen Flächen in einem wirbel- und quellenfreien Doppelfeld. Im elektrischen Strömungsfeld entspricht diese Größe der Leitfähigkeit, im elektrostatischen Feld der Kapazität. Mit Hilfe der Greenschen Funktion ergibt sich die allgemeine Formel

$$\Lambda_{12} = \frac{1}{4\pi} \int_{f_1} \int_{f_2} \lambda(p_i)\, \lambda(x_i)\, \frac{\partial^2 G(p_i, x_i)}{\partial p_i\, \partial x_i} df_i df_i. \qquad (33)$$

Schrifttum

1) A. Duschek u. A. Hochrainer: Grundzüge der Tensorrechnung in analytischer Darstellung, Teil I und II, Springer, Wien, 1950.

DIE EINSCHWINGFREQUENZ IN HOCHSPANNUNGSNETZEN

Rudolf Gärtner

DK 621.316.13.027.3/.8.018.3/.4

Leistungsschalter werden in erster Linie nach ihrem Ausschaltvermögen bei der Unterbrechung von Kurzschlüssen bewertet. Maßgebend hierfür sind der Ausschaltstrom und die wiederkehrende Spannung. Meist wird das Produkt aus beiden, die Ausschaltleistung in MVA, angegeben[1]). Da hierbei jedoch nur die Effektivwerte berücksichtigt werden, bleiben diese Angaben unvollkommen; denn es hat sich gezeigt, daß es bei der wiederkehrenden Spannung nicht nur auf ihre Höhe, sondern auch auf die Geschwindigkeit ihres Anstieges und auf den ganzen Verlauf ihres Einschwingvorganges ankommt. Erfolg oder Mißerfolg einer Ausschaltung hängen nämlich davon ab, ob die Spannung an der Schaltstrecke langsamer oder schneller als deren elektrische Festigkeit ansteigt.

Diese Vorgänge spielen sich in sehr kurzen Zeitspannen von wenigen Mikrosekunden bis etwa einer Millisekunde ab. Im Schleifenoszillogramm erscheint der Spannungsanstieg fast wie ein plötzlicher Sprung, und man konnte Unterschiede in der Anstiegsgeschwindigkeit zunächst kaum erkennen, solange man auf den Schleifenoszillographen allein angewiesen war. Als aber mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen eine bessere Beobachtungsmöglichkeit gegeben war, wurden die Zusammenhänge klarer[2, 3]). Es ist tatsächlich so, daß die Unterbrechung eines Stromes von 10 000 A bei einer Spannung von mehreren 100 000 V in dem Bruchteil einer tausendstel Sekunde entschieden wird.

Der Einschwingverlauf der wiederkehrenden Spannung ist in der Hauptsache vom Netz bestimmt, und seine Ermittlung erfordert eine rechnerische oder experimentelle Untersuchung des Netzes. Die verhältnismäßig großen Schwierigkeiten bei der Rechnung und Messung mögen unter anderem daran schuld gewesen sein, daß man die einschwingende Wiederkehrspannung und ihr Hauptmerkmal, die Einschwingfrequenz, bisher nicht ihrer Bedeutung entsprechend bei der Schalterbewertung berücksichtigt hat. Bedenkt man überdies, wie verschiedenartig die Netze sind und wie viele Schaltzustände in jedem einzelnen Netz berücksichtigt werden müssen, dann wird man verstehen, daß die Ergebnisse der bisherigen Netzuntersuchungen noch bei weitem nicht ausreichend sind und daß noch viel zu tun übrig bleibt.

Der vorliegende Bericht gibt nach einigen grundsätzlichen Betrachtungen einen Überblick über die wichtigsten Methoden zur Berechnung und Messung der Einschwingfrequenzen in Hochspannungsnetzen und über die Arbeiten im AEG-Hochspannungs-Institut auf diesem Gebiete.

Merkmale der einschwingenden Wiederkehrspannung

Bild 1 zeigt eine einfache Wechselstromanlage. An der Stelle K tritt ein Kurzschluß ein, der von dem Schalter S unterbrochen wird. L ist die Induktivität, C die Kapazität der Anlage; beide sind in Wirklichkeit über den ganzen Stromkreis verteilt, hier aber konzentriert dargestellt.

Bild 2 ist ein Schleifen-Oszillogramm der Kurzschlußausschaltung. Oben sieht man den Kurzschlußstrom, der im Zeitpunkt t_a unterbrochen wird, unten die Spannungen an der Schaltstrecke. Solange der Strom fließt, wird die Generator-EMK, die man sich gegenüber dem Strom um nahezu 90° voreilend hinzudenken muß, in der Hauptsache als induktiver Spannungsabfall im Kurzschlußstromkreis verzehrt. Im Zeitpunkt t_a, wo der Strom und der Spannungsabfall aufhören, tritt sie an der Schaltstrecke in Erscheinung, und die Spannung steigt dort von dem verhältnismäßig kleinen Wert der Lichtbogenspannung u_L in

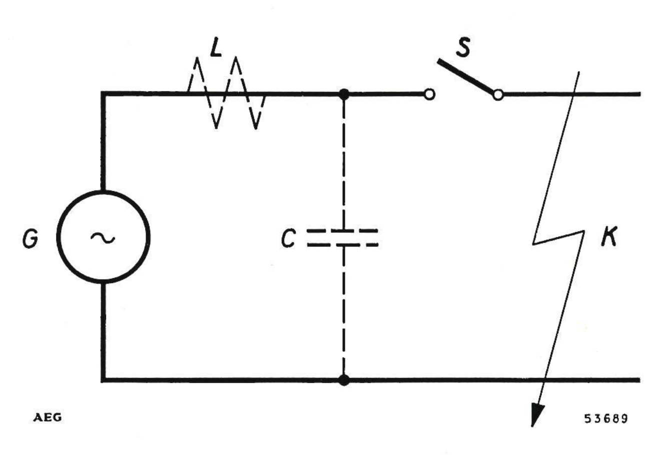


Bild 1. Einfache Wechselstromanlage mit Kurzschluß
G Wechselstromgenerator
L Induktivität des Stromkreises
C Kapazität des Stromkreises
S Schalter
K Kurzschluß

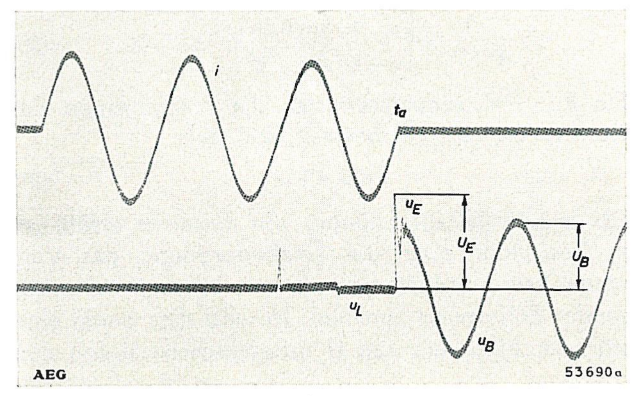


Bild 2. Schleifenoszillogramm einer Kurzschlußunterbrechung
Oben: i Kurzschlußstrom
t_a Zeitpunkt der Stromunterbrechung
Unten: Spannungen an der Schaltstrecke
u_L Lichtbogenspannung
u_E einschwingende Wiederkehrspannung
u_B betriebsfrequente Wiederkehrspannung
U_E höchster Wert der einschwingenden Wiederkehrspannung
U_B Amplitude der betriebsfrequenten Wiederkehrspannung

der erwähnten sehr kurzen, nach Mikrosekunden zählenden Zeit auf den Scheitelwert der EMK an. Dabei schießt sie in der Regel zuerst über ihr Ziel hinaus und schwingt dann mit der im wesentlichen durch die Netzinduktivität L und Netzkapazität C bestimmten Frequenz

$$f_E \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

auf die betriebsfrequente Spannung u_B ein. Das Verhältnis zwischen der höchsten Spannungsspitze U_E der einschwingenden Wiederkehrspannung und der Amplitude U_B der betriebsfrequenten Wiederkehrspannung

$$\gamma = \frac{U_E}{U_B}$$

wird Amplitudenfaktor oder Überschwingfaktor genannt. Einschwingfrequenz f_E und Überschwingfaktor γ sind die beiden Merkmale für die einschwingende Wiederkehrspannung u_E. Sie kennzeichnen zusammen mit der Amplitude U_B der betriebsfrequenten Spannung auch die Geschwindigkeit des Spannungsanstieges.

Das Verhalten des Schalters

Bild 3 ist das Kathodenstrahl-Oszillogramm der wiederkehrenden Spannung, das den Einschwingvorgang wegen der höheren Zeitauflösung viel deutlicher erkennen läßt als ein Schleifen-Oszillogramm. Neben der einschwingenden Wiederkehrspannung u_E ist auch die ansteigende elektrische Festigkeit der Schaltstrecke als gestrichelte Kurve b_1 eingezeichnet. Sie liegt in diesem Fall stets über der Spannungskurve, daher gelingt die Unterbrechung.

Wenn jedoch infolge eines größeren Kurzschlußstromes die elektrische Festigkeit langsamer, etwa nach der Kurve b_2, ansteigt, dann kommt es beim Punkt P zum Schnitt mit der Spannungskurve, und die Schaltstrecke wird neu gezündet. Würde die Spannung langsamer einschwingen, dann könnte sie unter der Kurve b_2 bleiben. Das heißt: Je niedriger die Einschwingfrequenz der wiederkehrenden Spannung ist, desto höher sind unter sonst gleichen Voraussetzungen die Kurzschlußströme und die Kurzschlußleistungen, die der Schalter unterbrechen kann.

Diese Gesetzmäßigkeit wird durch die Kurve 1 des Bildes 4 bestätigt. Sie stellt die gemessene Abhängigkeit der Ausschaltleistung eines 110 kV-Druckluftschalters von der Einschwingfrequenz dar. Man erkennt hier, wie unzureichend die bloße MVA-Angabe das Verhalten des Schalters kennzeichnet und wie wichtig eine zusätzliche Angabe der Einschwingfrequenz wäre; wobei noch hinzuzufügen ist, daß eine vollständige Kennzeichnung auch den Über-

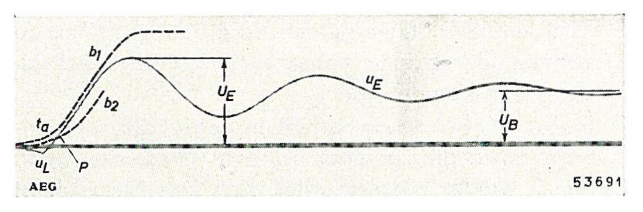


Bild 3. Kathodenstrahl-Oszillogramm der einschwingenden Wiederkehrspannung
- t_a Zeitpunkt der Kurzschlußstrom-Unterbrechung
- u_L Lichtbogenspannung
- u_E einschwingende Wiederkehrspannung
- U_E höchster Wert der einschwingenden Wiederkehrspannung
- U_B Amplitude der betriebsfrequenten Wiederkehrspannung
- b_1, b_2 elektrische Festigkeit der Schaltstrecke (Belastungskennlinien, b_1 nach kleinerem, b_2 nach größerem Kurzschlußstrom)

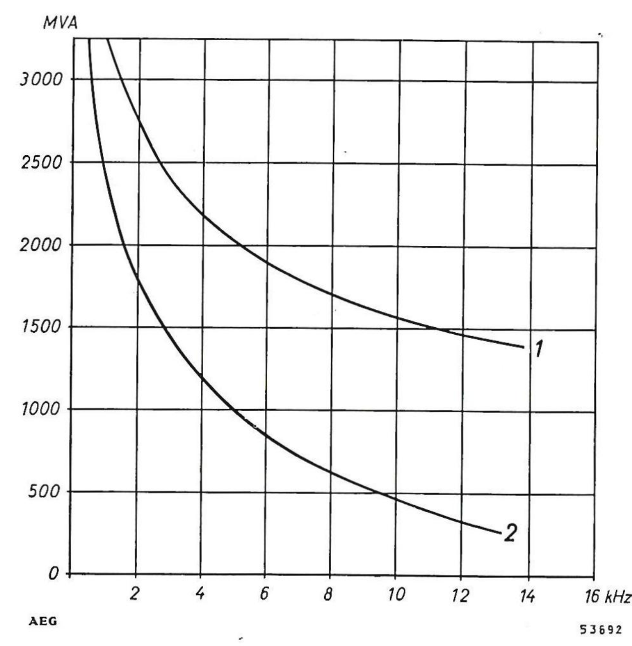


Bild 4. Ausschaltleistung (MVA) und Einschwingfrequenz (kHz)
Kurve 1: Ausschaltleistung eines 110 kV-Druckluftschalters (MVA) in Abhängigkeit von der Einschwingfrequenz (kHz)
Kurve 2: Zusammenhang zwischen Kurzschlußleistung (MVA) und Einschwingfrequenz (kHz) in einem 110 kV-Netz

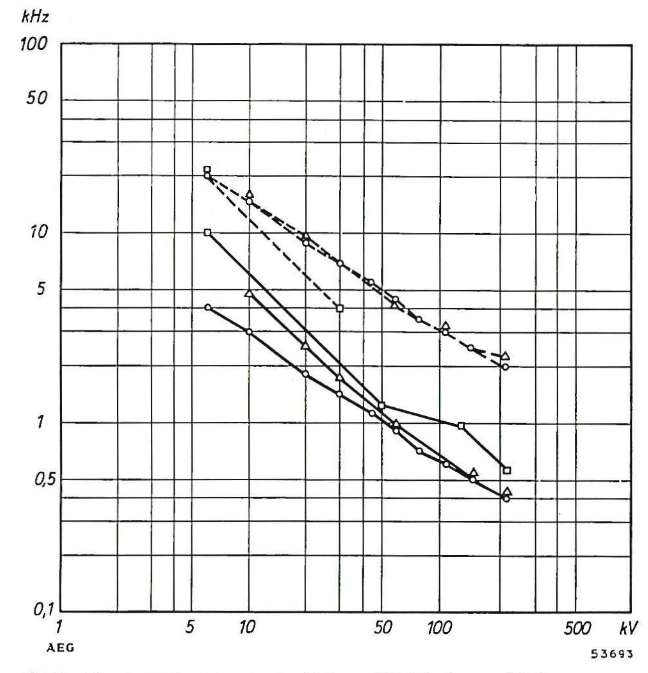


Bild 5. Einschwingfrequenzen in Netzen (kHz) bei verschiedenen Netzspannungen (kV)
○ Schweiz[5] △ Frankreich[6] □ Schweden[4]
Empfohlene Einschwingfrequenzen für die Prüfung von Schaltern:
——— bei voller Nennausschaltleistung (Schweden: über 500 MVA)
– – – bei halber Nennausschaltleistung (Schweden: unter 500 MVA)

schwingfaktor enthalten soll, der bei den Messungen der Kurve 1 in Bild 4 mit etwa 1,5 konstant gehalten wurde.
Die Kurve 2 gibt im Vergleich dazu einen Begriff von den Verhältnissen im Netz, die im nächsten Abschnitt behandelt werden.

Das Verhalten des Netzes

Dieser Abschnitt berichtet über die Gesetzmäßigkeiten, die in bezug auf die Einschwingfrequenzen in Netzen bisher festgestellt wurden. Bei aller Mannigfaltigkeit der Netze gelten doch grundsätzlich folgende Überlegungen: Je höher die Netzspannung, desto größer die Induktivitäten — während die Kapazitäten weniger beeinflußt werden — und desto niedriger infolgedessen die Einschwingfrequenzen. Diese Tendenz wurde durch die Untersuchung zahlreicher Netze in verschiedenen Ländern festgestellt[4, 5, 6]. Sie findet übereinstimmenden Ausdruck in den Kurven des Bildes 5.
Neben der Abhängigkeit der Einschwingfrequenz von der Netzspannung ist dabei auch eine Abhängigkeit von der Kurzschlußleistung zu erkennen, derart, daß größeren Kurzschlußleistungen niedrigere Einschwingfrequenzen zugeordnet sind. Diese Tatsache ist damit zu erklären, daß die Kurzschlußleistungen in der Regel um so größer werden, je mehr Kraftwerke und Netze gekuppelt sind[5]). Die größere Zahl von Leitungen bedingt dann eine größere Kapazität und damit eine niedrigere Einschwingfrequenz. Untersuchungen in deutschen Netzen haben diese Erfahrungsregel ebenfalls nachgewiesen[7]); die in einem 110 kV-Netz gewonnenen Ergebnisse sind in der bereits erwähnten Kurve 2 des Bildes 4 dargestellt. Es ist interessant, daß sich das aus Kurve 1 erkennbare Verhalten des Druckluftschalters den durch Kurve 2 dargestellten Voraussetzungen im Netz gut anpaßt.

Berechnungs- und Meßmethoden

Wenn man Bild 1 und die Formel $f_E \approx 1/2\pi\sqrt{LC}$ ansieht, dann scheint die Berechnung der Einschwingfrequenzen gar nicht so schwierig zu sein. Die Induktivitäten und Kapazitäten der Netzelemente lassen

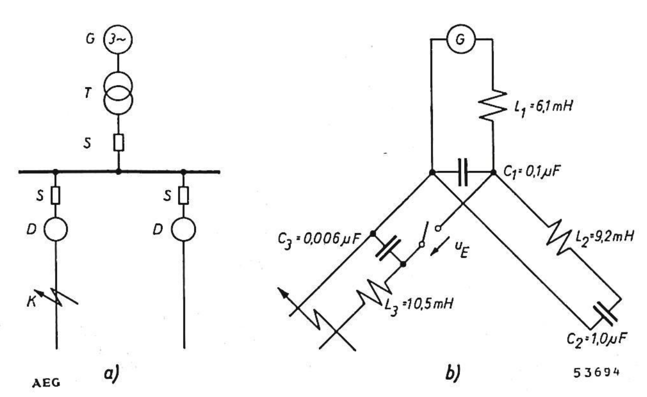


Bild 6. Drehstromnetz mit Kurzschluß
a Schaltplan; G Generator, T Transformator, S Schalter, D Drosseln, K Kurzschluß
b Schaltbild zur Berechnung der Einschwingfrequenzen

sich in der Tat ziemlich leicht und sicher bestimmen. Aber das Netz hat nur selten ein so einfaches Schaltbild wie in Bild 1. Ein Netz nach Bild 6a würde z. B. für die Berechnung der Einschwingfrequenzen durch das Bild 6b darzustellen sein, und dies ist noch bei weitem nicht der komplizierteste Fall. Zwar läßt sich auch ein Drehstromnetz in bezug auf den erstlöschenden Schalterpol für die Berechnung einphasig darstellen, aber die größere Anzahl der getrennten Kapazitäten ergibt eine ebenso große Anzahl verschiedener Einschwingfrequenzen, die sich in der Wiederkehrspannung überlagern. Hammarlund[8]) hat eine Berechnungsmethode angegeben und Wege gezeigt, wie allzu komplizierte Kreise auf Drei-, Zwei- und Ein-Frequenzenkreise in zulässiger Weise reduziert werden können.
Die Überschwingfaktoren werden dabei nicht berechnet. Bedenkt man die Fülle von Einflüssen, die hierfür maßgebend sind — erwähnt seien der Leitungswiderstand unter Berücksichtigung des Skin-Effektes, der Erdwiderstand des Kurzschlußstromes, die Ableitung und Korona, die Wirbelstrom-, Hysterese- und dielektrischen Verluste, der Nachstrom des Schalters, die Belastung des Netzes und der Leistungsfaktor des Kurzschlußstromes —, dann sieht man sich vorläufig für die Bestimmung der Überschwingfaktoren auf die Messung allein angewiesen.
Versuche im Netz dürfen meist nur unter der Bedingung durchgeführt werden, daß der Netzbetrieb nicht gestört wird. Daher werden alle Verfahren, die ein spannungsloses Netz verlangen, hier nicht erwähnt, sondern nur solche, die dieser Bedingung genügen.

1. Nach Kurth[9]) werden die Verbraucher durch einen Schalter mit Schnellwiedereinschaltung einen Augenblick lang abgetrennt, so kurz, daß keine Störung bemerkbar wird, und in dieser Pause wird ein durch eine Drossel begrenzter Kurzschluß ein- und sofort wieder ausgeschaltet. Die letzterwähnte Ausschaltung wird mit einem Kathodenstrahl-Oszillographen aufgenommen.
2. Nach Fourmarier[10]) wird die verhältnismäßig kleine Spannungsänderung oszillographiert, die bei der Abschaltung einer Last auftritt; diese weist nämlich alle Merkmale des gesuchten Einschwingvorganges auf. Die Netzspannung selbst wird, um ihre kleine Änderung gut beobachten zu können, durch eine entgegengerichtete Wechselspannung kompensiert.
3. Belot[11]) hat keine Bedenken gegen die unmittelbare Einschaltung eines Kurzschlusses, der dann gleich wieder ausgeschaltet wird. Das Netz bleibt dabei in Betrieb und wird dem Bericht zufolge nicht wesentlich gestört.
4. Schulze[7]) beschreibt die Registrierung der Einschwingfrequenzen mit einem Frequenz-Spektrometer, das an die Unterspannungsseite von Spannungswandlern angeschlossen wird. Die Messung erfolgt bei betriebsmäßigen Netzumschaltungen und ist sehr einfach. Allerdings erhält man dabei

nicht den Verlauf der Spannungskurve und den Überschwingfaktor wie bei den ersten drei Methoden.

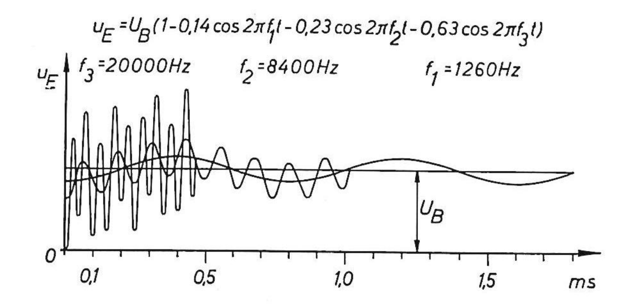
Die direkten Netzversuche mit Ausnahme des letzten sind schwierig durchführbar, und man bildet deshalb das Netz auch im Modell nach, wobei aber natürlich nicht alle Einzelheiten erfaßt werden können.

Arbeiten im AEG-Hochspannungs-Institut

Im Hochspannungsinstitut der AEG wurden die Einschwingfrequenzen in Netzen, besonders in Industrie- und städtischen Netzen nach der Methode von Hammarlund berechnet. In einzelnen, durch das Vorhandensein von Abzweigreaktanzen gekennzeichneten Fällen war es erforderlich, die Berechnungsunterlagen zu ergänzen, wobei die Laplace-Transformation gute Hilfe leistete. Ein solcher Fall liegt z. B. nach Bild 6 vor; die berechnete einschwingende Wiederkehrspannung ist in Bild 7 oben dargestellt. Eine Messung am Modell (Bild 7 unten) bestätigte die Richtigkeit der Rechnung.

Für die Messung der einschwingenden Wiederkehrspannung in Netzen — gedacht ist an ein Verfahren ähnlich dem von Fourmarier — wird ein Gerät entwickelt, bei dem auf die Kompensation unter Berücksichtigung der Netzoberwellen besonderer Wert gelegt wird.

Anzustreben ist, daß Rechnung und Messung, gegebenenfalls in gegenseitiger Ergänzung, bei guter Genauigkeit einfach in der Anwendung sind. Fruchtbar werden diese Untersuchungen, deren Aufgabe die Ermittlung der Einschwingfrequenzen in den Netzen ist, in Verbindung mit jenen anderen, die das Verhalten der Schalter bei verschiedenen Einschwingfrequenzen feststellen: Aufnahme von Kurven nach Art des Bildes 4, Kurve 1, für die Schalterleistung in



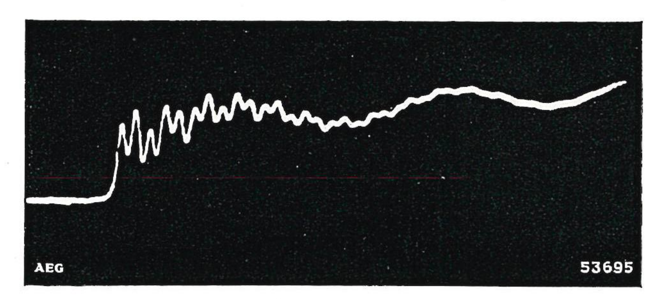


Bild 7. Einschwingende Wiederkehrspannung für den Kurzschlußfall nach Bild 6
oben: gerechnet (ohne Berücksichtigung der Dämpfung)
unten: am Modell oszillographiert
(Netzanalysator nach K. Kriechbaum)

Abhängigkeit von der Einschwingfrequenz, oder von Kurvenscharen wie in Bild 3 links für die ansteigende elektrische Festigkeit der Schaltstrecke bei verschiedenen Kurzschlußströmen, die man als „Kennlinienfelder"[12] bezeichnen kann, oder dergleichen. Auf diese Weise ist in mehrfacher Hinsicht Nutzen zu erwarten: für die richtige Auswahl von Schaltern, unter Umständen auch für die Gestaltung des Netzes, für die Erstellung zweckmäßiger Prüfvorschriften und eindeutiger Bewertungsgrundlagen der Schalter und nicht zuletzt für die Schaltertheorie und die Schalterentwicklung.

Schrifttum

1) VDE 0670 XI 41, Regeln für Wechselstrom-Hochspannungsgeräte.
2) F. Kesselring: Das Schalten großer Leistungen. ETZ 50 (1929) 28, S. 1005—1013, 27 B.
3) J. Biermanns: Hochleistungsschalter ohne Öl. ETZ 50 (1929) 30, S. 1073—1079, u. 31, S. 1114—1119, 40 B, 3 T.
4) O. S. Johansen: An investigation of the RRRV values and amplitude factors in Swedish power networks, and a proposal for RRRV reference values. CIGRE-Bericht (1952), Nr. 104.
5) E. Puppikofer und E. Juillard: Rapport sur l'activité du comité international d'études des interrupteurs, du 1er juillet 1946 au 1er juillet 1948. CIGRE-Bericht (1948), Nr. 138.
6) E. Juillard u. F. Kurth: Report of the activity of the international study committee Nr. 3 on circuit breakers. CIGRE-Bericht (1950), Nr. 147.
7) H. Schulze: Frequenz der wiederkehrenden Spannung. Energietechnik 3 (1953) 4, S. 148—156, 34 B, 2 T, 48 Qu.
8) P. Hammarlund: Transient recovery voltage subsequent to short-circuit interruption with special reference to Swedish power systems. Ingeniörs Vetenskaps Akademien, Handlingar Proceedings Nr. 189, Stockholm 1946.
9) F. Kurth: Fréquence de l'oscillation de la tension de rétablissement dans les réseaux à courant alternatif (Méthode pour la mesure directe sur le réseau et sans interruption de service). CIGRE-Bericht (1948), Nr. 139.
10) P. Fourmarier: New experimental methods for determining restriking voltage — Results obtained on the Belgium systems. CIGRE-Bericht (1950), Nr. 117.
11) R. Belot: The amplitude and inherent frequencies of the recovery voltage in the networks of the Unions de Centrales Electriques du Hainaut (Belgium). CIGRE-Bericht (1952), Nr. 109.
12) A. Hochrainer: Die Spannungskennlinien des Leistungsschalters. VDE-Fachberichte 17 (1953).

INHALTSVERZEICHNIS „HOCHSPANNUNGS-INSTITUT"

